FIZIKA

ZA VIŠE RAZREDE SREDNJIH ŠKOLA

NAPISAO

DR. STANKO HONDL

SVEUČILIŠNI PROFESOR

OVA JE KNJIGA ODOBRENA KAO PRIVREMENA ŠKOLSKA KNJIGA ODLUKOM BANA BANOVINE HRVATSKE BR. 40733-II-1940. OD 17. SRPNJA 1940.

CIJENA 86 DINARA

Z A G R E B 1940.

NAKLADA ŠKOLSKIH KNJIGA I TISKANICA BANOVINE HRVATSKE

18240

FIZIKA

ZA VIŠE RAZREDE SREDNJIH ŠKOLA

NAPISAO

DR. STANKO HONDL

SVEUČILIŠNI PROFESOR

OVA JE KNJIGA ODOBRENA KAO PRIVREMENA ŠKOLSKA KNJIGA ODLUKOM BANA BANOVINE HRVATSKE BR. 40733-II-1940. OD 17. SRPNJA 1940.

Ova je knjiga odobrena kao privremena školska knjiga rješenjem ministarstva nastave Nezavisne Države Hrvatske br. 20598-1941 od 16. srpnja 1941.

CIJENA 86 DINARA

ZAGREB 1940.

NAKLADA ŠKOLSKIH KNJIGA I TISKANICA BANOVINE HRVATSKE

Tisak
Zaklade Tiskare
Narodnih Novina u Zagrebu

PREDGOVOR

Prvo izdanje ove knjige izašlo je g. 1922., drugo početkom 1927. Ovo treće trebalo je u vrlo kratkom roku prirediti za tisak. Znatne su u njemu promjene, da je s obzirom na naučnu osnovu izostavljen I. odsjek II. izdanja (»Astronomija«) i da je VI. odsjek II. izdanja (»Nova fizika«) u ovom izdanju razrađen među ostalu građu. Pazio sam, da novo izdanje ne bi premašilo opsega predašnjega (uzetog bez njegova I. odsjeka). Trebalo je dakle štošta iz staroga izdanja izostaviti ili skratiti, da se ne bi mimoišle važne nove znanstvene tekovine. Ne mislim, da će mi tko prigovoriti, da sam unašajući novu građu učinio odviše.

Gg. profesorima dru. M. Kataliniću i dru. D. Pejnoviću zahvaljujem dvije slike, prvomu sl. 264. (oscilogram, snimljen oscilografom sa petljom), drugomu sl. 316. (ultrazvučni valovi, dio nepublicirane snimke). Wilsonovom metodom dobivene fotografije potječu iz ovih djela

Gentner, Maier-Leibnitz, Bothe, Atlas typischer Nebelkammerbilder, 1940. (sl. 272. i 275.)

Thibaud, Vie et transmutation des atomes, 1937. (sl. 274.)

Millikan, Cosmic Rays, 1939. (sl. 276. i 387.)

i iz Wilsonove poznate radnje (sl. 273.); spektri nebeskih magla u sl. 370. iz Hubble, The Realm of the Nebulae, 1936.; Laueov diagram sl. 385. iz Laue ove osnovne radnje. Od predašnjeg izdanja preuzete slike iz tuđih starijih knjiga jesu 63., 125., 137., 138., 143., 149., 150., 162, 163., 192., 280., 287., 288., 304., 307., 309., 310. i 313.

U Zagrebu, 9. rujna 1940.

S. H.

UVOD

1. Zadaća fizike. Fizika ide među znanosti, koje izučavaju prirodu (grč. φύσις). Ona opisuje i tumači pojave nežive prirode.

Sve se fizikalno znanje osniva na motrenju prirode. Motrimo li pojav, koji se zbiva bez naše pomoći, kažemo, da izvodimo opažanje. Ako sami izazivljemo pojav, što ga hoćemo proučiti, pravimo pokus (lat. *experimentum*). Onakvo opisivanje pojava, koje se osniva na motrenju, pri kojem nismo mjerili, jest kvalitativno (lat. *qualitas*, *kakvoća*). Znanje višega stepena t. j. kvantitativno (srednjelat. *quantitas*, *količoća*) dobiva se mjerenjima. Kad kažemo, da Röntgenove zrake idu kroz drvo, to je kvalitativno; a kad umijemo reći, koliki se dio tih zraka zaustavi u drvu debelom 1 cm, to je kvantitativno.

Znanost nastoji da nizove kvantitativnih činjenica obuhvati matematičkim formulama. Priložena tablica sadržava podatke o tome, kako zavisi obujam V litara nekoga plina o tlaku p atmosfera. Tu tablicu nadomješta formula $V = \frac{10}{p}$, koja kaže isto što i tablica, ali je potpunija, jer se za p može u formulu staviti kojigod broj, dok u tablicu možemo unijeti samo nekoliko vrijednosti. Ako se tablica našla mjerenjima, a onda se pogađanjem našla formula, koja je u skladu s tablicom, kažemo, da se zakon, što ga formula izražava, našao indukcijom (eksperimentalna fizika!).

atmosfere	litre
1	10
$1\frac{1}{2}$	$6\frac{2}{3}$
2	5
$2\frac{1}{2}$	4
3	$3\frac{1}{3}$

Kad tražimo fizikalne zakone, oslanjamo se, kao i u činima običnoga života, na spoznaju, da u prirodi doista i vlada zakonitost. To će reći: jednaki „uzroci" izvode jednake „učinke". Pustim li na pr. kamen iz ruke, a nema vjetra, pojav će se pada svaki puta jednako odigrati. Kad u slijedu događaja ne bi vrijedio ovaj vez zakonitosti, ne bi bilo znanosti, a ne bismo mogli ni upravljati svojim životom.

Fizikalne pojave tumačimo, kad pojedinačne zakone dovodimo u logički vez (teoretička fizika!) Poimence nastojimo, da indukcijom dođemo do što općenijih zakona, t. j. do zakona, koji obuhvataju što veći niz činjenica, pa da se iz tih općenih zakona matematički izvedu ili deduciraju pojedinačni zakoni. Uvelike je diglo ugled fizike, što je već u više zgoda

mogla dedukcijom pronaći n o v e zakone, za koje je iza teoretičkog otkrića i iskustvo pokazalo, da su valjani.

Kadgod znanosti uspije, da niz pojedinačnih zakona združi u jedan općeniji zakon, redovno će potonji obuhvatiti više pojava negoli oni pojedinačni zakoni zajedno. Dok se ne ispita sav sadržaj općenijega zakona, treba taj zakon smatrati h i p o t e z o m, t. j. tvrdnjom, koja nije dokazana, pa je možda i loša. Bilo ih je, koji držahu, da znanost može napredovati i bez hipoteza, no pokazalo se, da ona baš hipotezama zahvaljuje jake poticaje svoga napretka.

Među najznatnijim i najstarijim hipotezama bila je atomistička hipoteza, koju zasnovaše D e m o k r i t (Δημόκριτος 5. i 4. vijek pr. Kr.) i drugi. Ona uči, da je tvar građena od sitnih čestica, a t o m a (grč. ἄ τ ο μ ο ς, *nerazrezan*), kojih oko napose ne razabira, kako iz daljine ne vidimo ni pojedinih listova šume. Kažemo također, da je sastav tvari molekularan; t. j. ona sastoji od odjelitih hrpa atoma, koje zovemo m o l e k u l a m a (*malena množina tvari* prema lat. *moles*). Danas međutim atomističku nauku već ne brojimo među hipoteze, nego nam ona vrijedi kao utvrđena spoznaja.

Svi su fizikalni pojavi zamršeni. Do spretnosti je fizičara, da izluči iz motrenja sve, što nije važno, i da pokuse tako udešava, da ispitivani pojavi ne budu zastrti slabo poznatim sporednim pojavima. Povrh toga naša mjerenja nisu savršeno točna. No kako sve fizikalno znanje izvire iz motrenja, ne možemo dakle ni za koji fizikalni zakon tvrditi, da vrijedi savršeno točno.

Među fizikalnim se naukama velikim opsegom ističu a s t r o n o m i j a i k e m i j a, te ih odvajamo od fizike u užem smislu riječi. Fizika u najužem smislu ne obuhvata ni mehanike, koju mnogi čisto matematički obrađuju.

Gdjekada zovemo liječnika fizikom (physicus), jer i on ispitujući čovječje tijelo proučava prirodu. Englezi slično zovu liječnika (physician) i fizičara (physicist). U Engleza se teoretična fizika često zove „prirodna filozofija".

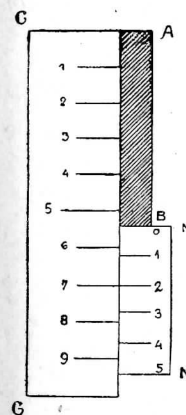
2. Mjerenje prostora i vremena. Fizikalni se pojavi zbivaju u prostoru i vremenu, pa mjerenje prostora i vremena ide među najobičnije poslove fizike. Jedinica je mjere dužine m e t a r (grč. μέτρον, *mjera*). Metar je razmak dvije crte na motki od platine i iridija, koja se čuva u međunarodnom uredu za mjere u Sèvresu, a priznata je (1889.) međunarodnim osnovnim mjerilom; spomenuta motka treba da ima temperaturu 0° C. 1 km (kilometar) = 1000 m (metara) = približno 0·0001 zemaljskoga kvadranta (četvrtine meridijana); točnije vrijedi: 1 kvadrant = 10002 km.

Isprva u Francuskoj odrediše (1795.), da metar imade biti dug koliko i 1 : 10000000 kvadranta; načiniše i mjerilo, koje tu dužinu pokazuje, pa ga pohraniše u Archives Nationales u Parizu. No našlo se, da taj arkivski metar nije toliko točno u skladu sa takvom definicijom mètra, koliko bi moglo biti. — Ured u Sèvresu osnovan je „metarskom konvencijom" (1875.), pa je mjerilo Sèvresko načinjeno tako, da se što bolje podudara s arkivskim metrom.

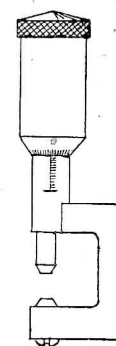
U fizici je najobičnija jedinica dužine c e n t i m e t a r, u mehaničkim radionicama 1 m i l i m e t a r ili mm. Kod izmjerivanja mikroskopskih predmeta

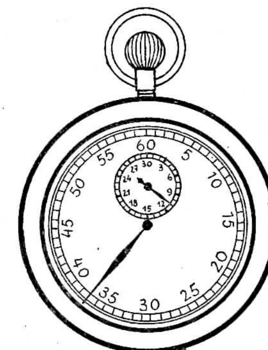
mnogo se upotrebljava 1 m i k r o n = 0·001 mm, za dužinu vala svjetlosti Å n g s t r ö m o v a jedinica = 0·000 000 1 mm, za dužinu vala Röntgenovih zraka X-jedinica = 0·000 000 000 1 mm. Upotrebljavaju se gdjekada i s t o p a i palac, pa je 1 stopa = 12 palaca; 1 engleski palac (inch) = 2·54 cm.

Mjerena će se dužina rijetko kada dosta točno podudarati s razmakom dviju crta mjerila; od oka cijenimo još desetinke najmanjega dijela mjerila, te ćemo mjerilom razdijeljenim u milimetre određivati dužinu na desetinke milimetra. Sigurnije je upotrebiti n o n i j (donekle sličnu spravu prvi je opisao N o n i u s ili Nuñez 1542.). Nonij objasnit ćemo slikom 1. Predmet *AB*, koji želimo mjeriti, prislonimo jednim krajem *A* uz početak glavnoga mjerila *GG*; na drugi



Sl. 1.


Sl. 2.



Sl. 3.

kraj *B* nadovežimo početak nonija *NN*. Ako je glavno mjerilo razdijeljeno u milimetre, a hoćemo odrediti još petinke milimetra, nonij treba da je tako uređen, da je 5 dijelova nonijevih = 4 mm; onda je svaki razdio nonijev za $^1/_5$ mm kraći od 1 mm. U crtnji podudara se dio „2" nonija s dijelom „7" glavnoga mjerila, dakle je dio „1" nonija udaljen od dijela „6" glavnoga mjerila za $^1/_5$ mm, a dio „0" nonija od dijela „5" glavnoga mjerila za $^2/_5$ mm; prema tome je predmet *AB* za $^2/_5$ mm dulji od 5 mm. (Mnogo se češće upotrebljava nonij kod kutnih ljestvica.)

Za mjerenje malenih debljina služi m i k r o m e t a r s k i v i j a k (Sl. 2.; grč. μικρός, *malen*). Ako zavoji vijka imadu „visinu" 1 mm, a vijak se okrene za cio okret, pomakne se u matici za 1 mm duž svoje osi. Ako je „b u b a n j" vijka razdijeljen u 100 jednakih dijelova, može se i pomak 0·01 mm na bubnju očitati.

Jedinica mjere vremena jest 1 (g r a đ a n s k i) d a n. Kako se ta jedinica određuje, uči astronomija. 1 dan = 24 sata, jedan sat = 60 minuta,

1 minuta = 60 sekundi. („Minuta" je skraćeno prema lat. ***minuta** pars prima, umanjeni dio prvi,* „sekunda" skraćeno prema *minuta pars* ***secunda**, umanjeni dio drugi.*) 1 dan = 86400 sekunda; Zemlja načini potpun okret (s obzirom na zvijezde stajaćice!) u 86156 sekunda.

Za mjerenje vremenskih razmaka često služi zaporna ura ili hronoskop (grč. χρόνος, *vrijeme*; σκοπέω, *gledam*). Velika kazaljka te džepne ure (sl. 3.) načini u 1 minuti 1 okret, a pokazuje petinke sekunde. Kad kazaljka miruje na znaku „0", stavi se ura u pogon tako, da prstom pritisnemo na krunicu njezinu; kad nanovo pritisnemo, ura stane. (Slijedeći pritisak vraća onda kazaljku na znak „0".)

Jedinice za mjerenje kutova jesu raznovrsne.

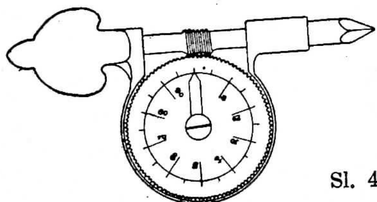
1. Stupanj, minuta i sekunda; $1^0 = 3600''$.

2. Kut, za koji se zakrenuo neki stroj, mjerimo na okrete; 1 okret $= 360^0$.

3. Često je najzgodnija jedinica t. zv. lučne mjere; zove se radijan; središnji kut nekoga kruga jest 1 radijan, ako je pripadajući luk jednak polumjeru r. Kako luku r cm pripada središnji kut 1 radijan, cijeloj će periferiji $2\ r\ \pi$ pripadati središnji kut $2\ \pi$ radijana; dakle je $360^0 = 2\ \pi$ radijana, a 1 radijan $= 57^0 17' 45''$, $1^0 = 0{\cdot}017453$ radijana. Ako se kut mjeri radijanima, vrijedi jednostavna relacija

luk = polumjer × središnji kut.

Okret stroja mjeri se brojačem (sl. 4.). Brojač držimo rukom pritisnut na os stroja, tako da je os brojača u produženju osi stroja. Radi trenja obje se osi jednako brzo vrte. U vijak na osi brojača hvataju zupci jednoga kotača, te se kod svakoga okreta stroja kotač pomakne za 1 zubac. Na kotaču je ljestvica, koja pokazuje broj zubaca; ispred ljestvice je nepomična kazaljka.



Sl. 4.

3. Tumač nekih naziva.

Jedinice „praktičnog" sustava električnih mjera zovu se po odličnim fizičarima. Nazivi tih jedinica, vrst mjerene veličine i ime fizičara sadržani su u ovom popisu:

džul	radnja	Joule
vat	snaga	Watt
kulon	množina elektriciteta	Coulomb
amper	jakost električne struje	Ampère
om	električni otpor	Ohm
volt	električna napetost	Volta
farad	električni kapacitet	Faraday
henri	koeficijent samoindukcije	J. Henry.

U decimalnom se sustavu mjerâ manje jedinice razlikuju od većih faktorom, koji je potencija broja 10. Ove potencije imadu osobita imena, te je

deka	=	10	deci	=	0·1
hekto		100	centi		0·01
kilo		1000	mili		0·001
mega		1000000	mikro		0·000001

(U grčkom i latinskom znači δέκα, *decem*, 10; ἑκατόν, *centum*, 100; χίλιοι, *mille*, 1000; μέγας, *velik*). Stavljajući ove nazive pred ime osnovne jedinice dobiva se ime veće ili manje jedinice. Tako je 1 kilometar = 1000 metara, 1 kilovat = 1000 vata, 1 mikroamper = 0·000001 ampera. Izuzetak je, što se 0·000001 metra zove naprosto 1 mikron.

4. Algebarski znaci.

Mnoge se fizikalne veličine često bilježe slovima, koja su u fizikalnim knjigama svih naroda ista. Ta su slova početna slova riječi, koje su bar u nekom savezu sa značenjem fizikalne veličine. Na pr. često znači:

a	**a**kceleracija
c	brzina, koja je stalna (lat. **c**eleritas)
c, C	kapacitet električki ili toplinski (specif. toplina) (lat. **c**apacitas).
e	**e**lektrički naboj
f	žarišna daljina (lat. **f**ocus.)
g	akceleracija sile teže (lat. **g**ravitas)
i	jakost struje (lat. **i**ntensitas)
k	**k**onstanta
l	dužina (lat. **l**ongitudo)
λ	(grčko l) dužina vala
m	**m**asa
n	broj, na pr. broj titraja (lat. **n**umerus)
p	sila, težina (lat. **p**ondus), tlak
q	množina topline (lat. **q**uantitas)
r	polumjer (lat. **r**adius); otpor (**r**esistencija)
s	razmak (lat. **s**patium), put
t	vrijeme (lat. **t**empus); **t**emperatura
v	brzina, koja se mijenja (lat. **v**elocitas)
v, V	obujam (lat. **v**olumen)
w	radnja (engl. **w**ork)

Znak Δ (grčko D, **d**iferencija) stavljen pred znak neke veličine znači porast te veličine, te je na pr. Δs porast puta s, Δt porast vremena t.

Znak Σ (grčko S, **s**uma) pred nekim algebarskim izrazom označuje zbroj od mnogo istovrsnih izraza. Zbroj masa m_1, m_2, m_3 . . . bilježi se dakle Σm.

Slično tome znači $\int$ (rastegnuto S) zbroj od beskrajno mnogo beskrajno malenih pribrojnika (integral).

Da naročito istaknemo, da su dvije veličine samo približno jednake, upotrebit ćemo znak „$\doteq$". Na pr. ako su α i β maleni spram broja 1, vrijedi relacija $(1 + \alpha) \cdot (1 + \beta) \doteq 1 + \alpha + \beta$.

Vrlo veliki i vrlo maleni brojevi bilježe se uvođenjem potencija broja 10. U 1 gramu vodika imade 598000 000000 000000 000000 atoma; taj se broj kraće bilježi ovako $5{\cdot}98 \times 10^{25}$. Tim se jasno ističe, koliko nam je znamenaka broja doista poznato; sve su poznate znamenke (t. j. 5, 9 i 8) u prvom faktoru. 1 atom vodika važe 0·000000 000000 000000 000001 67 grama; kraće se to piše $1{\cdot}67 \times 10^{-24}$.

Za čitanje velikih brojeva treba imati na umu, da je:

10^{6} miljun, 10^{12} biljun, 10^{18} triljun

10^{-6} miljuntina, 10^{-12} biljuntina, 10^{-18} triljuntina. (Tako čitaju Englezi i Nijemci, dok Francuzima i Amerikancima znači biljun 10^{9}, triljun 10^{12}.)

5. **Kratice.** U ovoj se knjizi upotrebljavaju ove kratice:

m	metar
g	gram, masa
g*	gram, sila
dm, cm, mm; km	decimetar, centimetar, milimetar; kilometar
dg, cg, mg; dkg, kg	decigram, centigram. miligram; dekagram, kilogram
m^2 itd.	kvadratni metar i t. d.
m^3 itd.	kubični metar i t. d.
c-g-s-sustav	centimetar-gram-sekunda-sustav
el.-st.	elektrostatski
el.-magn.	elektromagnetski
kal, kgkal	kilogramkalorija
g kal	gramkalorija
min, sek	minuta, sekunda vremenska
h, m, s	(u višeimenom broju) sat, minuta, sekunda
′, ″	minuta, sekunda kutna
^{0}	stupanj, za mjerenje razlike temperatura
^{0}C	stupnjevi „Celzijeve“ temperature
^{0}K	stupnjevi apsolutne temperature (K prema: Lord Kelvin)
KS	konjska snaga.

6. **Druge upute.** Neki učenici misle, da bi se fizika mogla učiti samo kvalitativno, poimence bez matematičkih formula. To je mišljenje sasvim krivo. Ima doduše fizikalnih činjenica — pa i vrlo zanimljivih, koje se mogu opisati, a da se ne spomene nijedan broj; no poprijeko vrijedi, da je puko kvalitativno prikazivanje fizikalnih pojava nedostatno i nepregledno. Da se olakša shvatanje matematičkih česti fizike, valja spomenuti, da je kod prvoga učenja uopće lakše, a i važnije upoznati sadržaj fizikalne formule, nego li njezin izvod; prema tome su u ovoj knjizi radi kratkoće mnoga izvođenja izostavljena.

Kod krupnijih fizikalnih mjerenja pogreška mjerenja znade iznositi na pr. 1%, to će reći pogreška je dosegla 0·01 vrijednosti mjerene veličine. Rijetko kada mjerimo tako točno, da pogreška ne premašuje 0·01%.

Prema točnosti, kojom poznajemo brojeve, što izražavaju fizikalne veličine, treba udesiti i točnost računanja s tima brojevima. Sa fizikalnim se veličinama računa skraćeno; ako se računa uz pomoć logaritamskih tablica, ne treba uzeti tablice sa odviše znamenaka. Ako su brojevi poznati na 3 mjesta, vrlo se zgodno izvode računi (logaritamskim) računačem.

Za mnoge je fizikalne činjenice u ovoj knjizi spomenuto, tko ih je našao i kada su otkrivene. Ime i godina otkrića obično su u zagradi. Gdjekoje od spomenutih godina vrijede samo približno, jer se doba otkrića nije dalo točnije odrediti. Nikako nije potrebno sve te brojke pamtiti; one su iznesene, jer kraće i točnije označuju neki čas negoli kad bi se reklo na pr. „u 2. polovici 17. vijeka“ ili „na prelazu iz 16. u 17. vijek“, što bi također dostajalo. Svrha je povijesnih podataka, da se vidi, koliko je vremena trebalo, da se sagradi današnja fizikalna nauka, i koliko je ljudi surađivalo kod upoznavanja na oko jednostavnih činjenica.

Teškoće, na koje danas nailazimo učeći fiziku, od velike su česti one iste, s kojima se i znanost u svom razvoju najviše borila; poradi toga motreći povijesni razvoj jasno uočujemo te teškoće, pa ih i lakše svladavamo. Učenjem povijesti fizike unapređuje se i razvoj suvremene znanosti.

Izgovor tuđih imena u mnogo se slučajeva ne da prikazati glasovima hrvatskoga jezika. Zato ova knjiga ni ne donosi toga izgovora. Hoćemo li manje ili više vjerno izgovoriti tuđe ime, nije važno; glavno je da pamtimo i poštujemo njegov pravopis. (Iznimku dopuštamo kod klasičnih i polatinjenih imena, na pr. Demokrit, Celzij.)

I. MEHANIKA

1. Mehanika tvarne točke

a) Statika točke

7. Što je mehanika? Nauka, koja opisuje gibanja ne pitajući za uzroke njihove, zove se kinematika (grč. κίνημα, *gibanje*). Osnovni su pojmovi kinematike geometrijski pojmovi (dužina, kut i t. d.) i vrijeme. Keplerovi zakoni gibanja planeta zasijecaju u kinematiku, tako isto i vozni red željeznice. — Sva poznata tjelesa podložena su bilo kakvoj sili, pa su na pr. sva tjelesa teška. Ako tijelo miruje, kažemo, da sile, što na nj djeluju, drže sebi ravnotežu. Nauka, koja ispituje ravnotežu sila, zove se statika (grč. prema ἵστημι, *stojim*). Osnovni su pojmovi statike geometrijski pojmovi i sila. — Nauka o gibanju i silama zove se dinamika (grč. δύναμις, sila). Kinematika podređena je dinamici, a statika i dinamika zajedno tvore mehaniku (grč. μηχανή, *oruđe, stroj*).

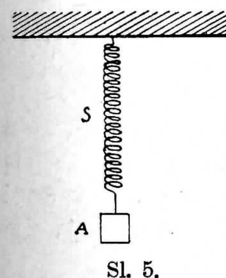
Ako ispitujući gibanje tijela ne trebamo paziti na razlike između gibanja pojedinih dijelova tijela, nadomještamo tijelo u misli jednom točkom; zovemo je tvarnom točkom. I same se zvijezde u mnogim astronomskim istraživanjima uzimlju kao tvarne točke. Budući da je točka najjednostavnija geometrijska tvorina, mehanika je tvarne točke manje zapletena od ostalih česti mehanike.

8. Pojam sile. Kad rukom natežem elastičnu uzvojnicu (spiralu, grč. σπεῖρα, *zavoj*) ili kad rukom dižem kamen, izvodim „silu"; potonja riječ u prvi mah ne znači drugo već kratku oznaku za oćute, koji prate moj napor. Isprva je dakle „sila" čisto fiziološki pojam. — Učvrsti li se jedan kraj elastične uzvojnice, a na drugi se objesi utez, utez će uzvojnicu nategnuti. (Sl. 5.). Čovječja je sila sada nadomještena nekom neživom silom, težinom uteza; u drugu se ruku može reći, da uzvojnica drži utez „elastičnom" silom. Govorimo dakle o „sili teže" i o „elastičnoj sili", a da ipak ne pomišljamo, da utez i uzvojnica imadu oćut sile. To je fizikalni pojam sile. Naučnu vrijednost dobiva taj pojam, kad se uglavi, kako se sile ispoređuju i mjere.

Ako dva uteza A i B svojim težinama jednako mnogo nategnu neku uzvojnicu, kažemo, da su jednako teški. Ako utez C nategne uzvojnicu toliko, koliko utezi A i B, kad zajedno djeluju, kažemo, da je težina uteza C jednaka zbroju težina uteza A i B i t. d. Pri tom ispoređivanju vazda

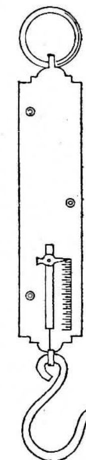
čekamo, dok se utezi i uzvojnica ne primire; ispoređujemo dakle sile u ravnoteži ili „statički".

Za jedinicu sile često uzimljemo težinu valjka od platine i iridija, koji se kao osnovno mjerilo čuva u „Međunarodnom uredu za uteze i mjere" u Sèvresu, a zove se 1 kilogram (grč. γράμμα, vrst uteza). Budući da se težina tijela ponešto mijenja, kad se tijelo prenosi s jednoga mjesta Zemlje na drugo, treba dodati, da — prema dogovoru — spomenuti utez ima težinu 1 kilogram na površini morskoj na 45^0 širine. (Isp. uostalom § 19.) Kako se izraz „kilogram" upotrebljava još i u drugom značenju, bilježit ćemo silu 1 kilogram sa znakom * dakle: 1 kg*. — Manja je jedinica sile 1 g* = 0·001 kg*, veća 1 tona* = 1000 kg* („*tona*" = „*bačva*", u različitim jezicima.)



Sl. 5.

Za praktično ispoređivanje sila služi na pr. vaga na pero (sl. 6.). Ona ima elastičnu uzvojnicu, kojoj je jedan kraj učvršćen, a s drugim je krajem spojena kazaljka, koja se nalazi pred ljestvicom razdijeljenom u kilograme.

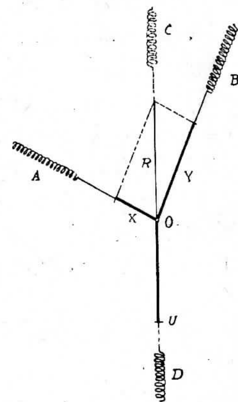

Sl. 6.

9. Dvije sile u ravnoteži. Utez A neka mirno visi na elastičnoj uzvojnici S (sl. 5.). Na utez djeluje težina njegova u smjeru vertikalnom prema dolje, dok ga u protivnom smjeru vuče elastična sila uzvojnice. Te su sile jednako velike. O tom se možemo uvjeriti, ako uzmemo jednu pomoćnu elastičnu uzvojnicu U, pa pustimo, da je nateže jedamput utez A, drugi put uzvojnica S onoliko nategnuta, koliko je bila prije produljena utezom A; u svakom će se primjeru U jednako produljiti. — Može se i uopće reći: dvije su sile u ravnoteži, ako su jednako velike i protivnih smjerova.

Kad tijelo počiva na ravnoj horizontalnoj podlozi, težini tijela drži ravnotežu pritisak podloge, koji djeluje vertikalno u vis, a veličinom je jednak težini tijela. Ako je podloga vanredno glatka, a nije horizontalna, tijelo ne može mirovati; pritisak vrlo glatke plohe na neko tijelo okomit je na plohu, pa ako ta ploha nije vodoravna, pritisak njezin ne može biti u ravnoteži sa težinom tijela.

Sila se može predočiti geometrijski (grafički) kao dužina. Pri tome se veličina dužine prema dogovorenom omjeru podudara s veličinom sile, te na pr. svaki cm znači 2 kg*; smjer dužine pokazuje smjer sile, pa gledajući od „početka" dužine prema „kraju" njezinom gledamo u smjeru sile (Stevin 1585.). — Grafička statika rješava zadaće o ravnoteži sila crtnjom.

10. Paralelogram sila. Dvije vage na pero C i D (sl. 7.) neka užetima vuku sasvim lako tijelo O i drže ravnotežu. Sila R kg* prve vage jednaka je i protivna sili U kg* druge vage. Uz koji se uvjet može vaga C nadomjestiti sa dvije vage A i B, koje vuku različitim smjerovima, a silama X kg* i Y kg*, pa da se ravnoteža ne pokvari? Drugima riječima: kako se može „rezultanta" R „rastaviti" u „komponente" X i Y? Treba nacrtati paralelogram, u kojemu je rezultanta predočena dijagonalom, a komponente stranicama, te ove tri sile imadu zajednički početak. To je zakon paralelograma sila (Stevin 1585.). Uz pomoć triju vaga na pero može se taj zakon lako utvrditi.



Sl. 7.

Budući da možemo nacrtati mnogo paralelograma, koji imadu zadanu dijagonalu R, možemo silu R na mnogo načina rastaviti u komponente. Obrnuto; X i Y „sastavljanjem" daju sasvim određenu rezultantu R.

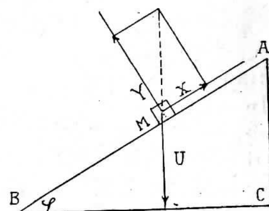
Ako smjerovi dviju sila leže u istom pravcu, bit će i rezultanta njihova u tom pravcu, te je jednaka ili zbroju ili razlici komponenata.

Nazivi „komponenta" i „rezultanta" dolaze od lat. *compono, sastavljam* i *resulto, odskačem*, srednjelat. *postajem*.

Zad. **1.** Tijelo, koje natežu tri užeta silama $X = 4$ kg*, $Y = 5$ kg*, $U = 7$ kg*, jest u ravnoteži. Koliki su kutovi među užetima? Riješidba a) crtnjom, b) trigonometrijski.

Zad. **2.** Tijelo teško 1 kg* visi na dvije žice, koje su prema vodoravnoj ravnini priklonjene za 5°. Koliko su žice napete?

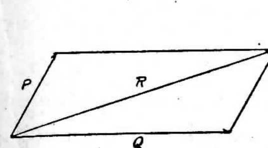
11. Ravnoteža na kosini. Na vrlo glatkoj „kosini" t. j. ravnoj podlozi, koja je priklonjena prema vodoravnoj ravnini, tijelo M (sl. 8.) miruje, ako osim težine tijela U i pritiska kosine Y djeluje još koja zgodno odabrana sila X. Neka na pr. ta pomoćna sila vuče tijelo uz kosinu smjerom, koji je usporedan kosini, a prema vodoravnoj je ravnini priklonjen koliko i sama kosina t. j. za kut φ. Rezultanta sila X i Y poznata je veličinom i smjerom, jer je jednaka i protivna težini U; sile X i Y poznate su samo smjerovima; to dostaje, da se nacrta paralelogram sila. Iz crtnje izilazi, da je $X = U \sin \varphi$, $Y = U \cos \varphi$. (Koliko je X ili „težina tijela na kosini", poznato je bilo već u 13. vijeku).



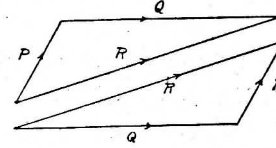
Sl. 8.

Zad. **3.** Neka se skrižaljkom prikaže, kolike su sile X i Y u sl. 8., ako je težina $U = 100$ g*, priklon $\varphi = 0°, 30°, 60°, 90°$.

Zad. **4.** Kola zagrebačke uspinjače vuku se užetom na pruzi, kojoj je priklon = 28°. Koliko pridonosi napetosti užeta čovjek u kolima težak 70 kg*?

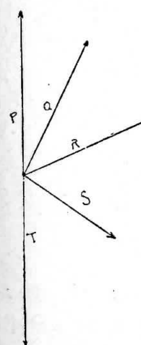


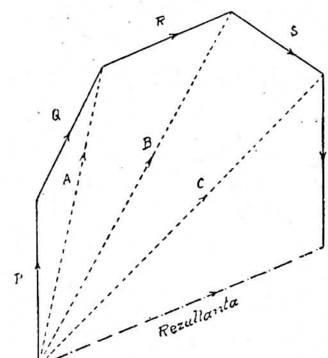
Sl. 9.



Sl. 10.

12. Trokut i mnogokut sila. Crtnja paralelograma sila (sl. 9.) može se radi kratkoće nadomjestiti crtanjem trokuta sila (sl. 10.). Nacrta se jedna komponenta, na njezin se kraj nadoveže početak druge komponente, pa je početak rezultante početak prve komponente, a kraj rezultante kraj druge komponente. Iz slike se vidi, da se trokut sila može nacrtati na dva načina.



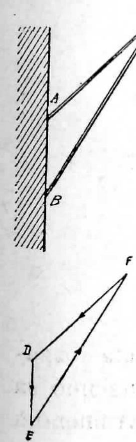


Sl. 11.

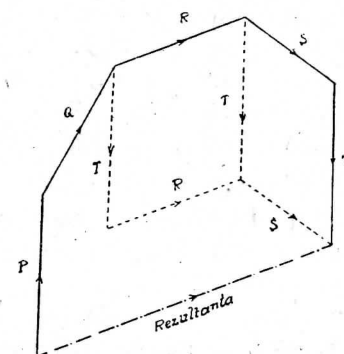
Rezultanta od više sila na pr. od sila P, Q, R, S, T (sl. 11.) dobiva se tako, da se najprije nađe rezultanta A sila P i Q, zatim rezultanta B sila A i R, onda rezultanta C sila B i S, najposlije rezultanta sila C i T, koja je rezultanta svih zadanih sila.

Razabira se, da su sile A, B, C u crtnji suvišne, pa dostaje da se od zadanih sila i njihove rezultante načini mnogokut sila. Sl. 12. pokazuje, da je svejedno, kojim se redom komponente nižu u mnogokut; poredaji $PQRST$, $PQRTS$, $PQTRS$ i t. d. vode do iste rezultante.

Sile su u ravnoteži, ako se u mnogokutu sila početak prve sile podudara sa krajem posljednje (onda je rezultanta = 0).



Sl. 13.



Sl. 12.

Primjer. Dva štapa, od kojih se jedan može kretati oko krajnje točke A (sl. 13.), drugi oko krajnje točke B, gdje je AB vertikalan pravac, sastaju se svojim drugim krajnjim točkama u „zglobu" O; na zglobu visi teret poznate težine. Treba odrediti napetost štapa AO i napetost štapa BO. Sila, kojom svaki štap djeluje na zglob, ima smjer štapa. Ako dakle dužina DE znači težinu tereta, dobit će se mnogokut sila, ako se kroz jednu od točaka D i E načini usporednica sa AO, kroz drugu usporednicu sa BO. Time dobivene

stranice EF i FD znače sile štapova. One su sa silom DE u ravnoteži, pa se u mnogokutu sila kraj posljednje sile podudara s početkom prve. Izlazi, da štap AO nateže zglob silom FD, dok ga štap BO pritiskuje silom EF.

b) Dinamika pravocrtnoga gibanja

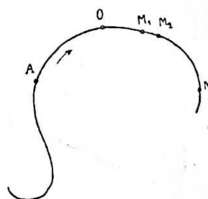
13. Jednoliko gibanje. Tijelo se giblje „jednoliko", ako u kojimgod jednakima vremenima prevali jednake putove. Kako se zakon jednolikoga gibanja prikazuje algebarski, neka objasni ovaj primjer. Neka tijelo na putu AOM (sl. 14.) svake sekunde prevali 4 dm; put s dm mjerimo počevši od točke A; kad tijelo stigne u točku O, gdje je $AO = 3$ dm, počinjemo brojiti vrijeme; kad je prošlo vrijeme t sek, neka je put $AM = s$ dm. Budući da je u t sek prevaljen put $OM = 4\,t$ dm, slijedi iz $AM = OM + AO$:

$$s = 4t + 3.$$

Ta formula kaže, kako s vremenom t raste put s. Opći je oblik zakona jednolikoga gibanja

$$s = ct + k,$$

gdje su c i k stalne veličine.



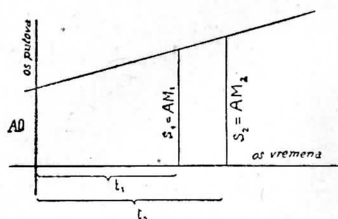
Sl. 14.

Često se zakon gibanja grafički prikazuje, i to ovako: U pravokutnom se koordinatnom sustavu vrijednosti vremena t nanose kao apscise, a vrijednosti puta s kao ordinate (jedno i drugo u zgodnom mjerilu). Po dvije vrijednosti t i s, koje pripadaju jedna drugoj, određuju točku u ravnini; sve tako dobivene točke zajedno prikazuju zakon gibanja. (Grafički vozni red željeznica!) Jednoliko je gibanje grafički predočeno pravcem (Sl. 15.), kako je pobliže u matematici objašnjeno.

Koeficijent c u zakonu jednolika gibanja zove se brzina. Ona nam kazuje, kolik put tijelo prevali u 1 sekundi. Brzina se izračunava ovako. Neka je do časa t_1 prevaljen put $s_1 = AM_1$, do časa t_2 put $s_2 = AM_2$. Iz formula

$$s_1 = ct_1 + k, \quad s_2 = ct_2 + k$$

dobiva se odbidbom i dijeljenjem



Sl. 15.

$$c = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1};$$

no $t_2 - t_1$ je razmak spomenutih časova, pa taj komad vremena označimo sa Δt; $s_2 - s_1 = M_1 M_2$ ili porast puta u vremenu Δt označimo sa Δs. Brzina se dakle izračunava dijeleći kojigod komad puta Δs s vremenom Δt, u kojem je taj put prevaljen:

$$= \frac{\Delta s}{\Delta t}.$$

Kod grafičkog prikazivanja bit će pravac, koji predočuje zakon jednolikoga gibanja, to više priklonjen prema osi vremena, što je brzina veća.

Kad se vrijeme mjeri sekundama, put decimetrima, jedinica je brzine „decimetar u sekundi"; bilježi se ta jedinica znakom „dm/sek", što podsjeća na propis, prema kojemu se brzina izračunava iz puta i vremena. Ako se vrijeme mjeri na sate, put na kilometre, jedinica je brzine km/sat. Tako se vazda jedinica brzine prilagođuje jedinici vremena i jedinici puta.

Zad. 5. Brzine električnih lokomotiva već su nadmašile vrijednost 200 km/sat, najveća brzina Messerschmitt-aeroplana bila je 26. IV. 1939. 755·11 km/sat; koliko je to m/sek?

Zad. 6. Koliko je puta brzina $1 \frac{\text{morska milja}}{\text{sat}}$ (1 „uzao") veća od brzine 1 m/sek? Morska je milja dužina luka meridijana, koji obuhvata 1', a kvadrant meridijana ima 10^7 m.

14. Zakon ustrajnosti. Ide li čovjek ravnim horizontalnim putom, treba tome neprestani napor; da se željeznička lokomotiva giblje jednoliko u vodoravnom pravcu, treba tome neprestana radnja parnoga stroja. Iskustva ove ruke zavode na mišljenje, da za jednoliko gibanje treba stalna sila. No gurnemo li tijelo na horizontalnu podlogu, ne će se ono odmah zaustaviti (na pr. željeznička kola na tračnicama!). Što bolje uklonimo zapreke, to dulje će tijelo u svom gibanju ustrajati i kad bi se mogle zapreke sasvim ukloniti, a zemlja bi bila ravna ploča, držimo, da bi se na njoj kola bez djelovanja sile gibala jednoliko u pravcu. To uvjerenje izriče se zakonom ustrajnosti, koji kaže:

ako na tijelo ne djeluje sila, tijelo se giblje jednoliko u pravcu (Galilei 1609.). Newtonov I. aksiom mehanike (1687.)

Doduše u zamišljenom primjeru ima ipak još sila, a to je težina tijela, ali njoj drži ravnotežu tlak tla, pa se sile uništavaju. Kod lokomotive prilike su još zamršenije: težini lokomotive drži ravnotežu tlak tla, dok je sila, što je izvodi parni stroj, baš tolika, da održi ravnotežu svima silama od zapreka.

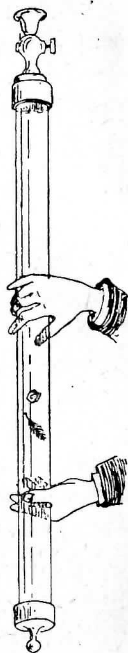
Mirovanje može se pomišljati kao gibanje sa brzinom $c = 0$; mirno će tijelo ostati u miru, ako na nj ne djeluje nikoja sila. Iz vertikalnog stupa sastavljenog od niskih valjaka može se snažnim horizontalnim udarcem kojigod valjak izbiti, a da se ipak stup ne sruši; ostao je na mjestu radi ustrajnosti (Leonardo da Vinci).

Zad. 7. Tijelo teško 100 kg* treba jednoliko vući uz glatku kosinu 5 m daleko kolika treba da je sila, ako se pri tome tijelo popne 3 m visoko? [60 kg*]

15. Prosti pad. Pustim li kamen iz ruke, padat će sve brže. Odavna su o tom neki ovako zaključivali. Pustim li dva sasvim jednaka tijela, da padaju svako napose, padat će jednako; sastavim li oba tijela u jedno, t. j. u tijelo dvostruke težine, zacijelo će sastavljeno tijelo padati po onom istom zakonu, što vrijedi za padanje pojedinačnih tjelesa. Očekujemo dakle,

da lako tijelo i teško tijelo padaju jednako, te u 1 sek jedno i drugo padnu do iste dubljine. Međutim taj zakon vrijedi samo kod „prostog“ pada t. j. onda, kad nije znatan otpor uzduha ni vjetar. Pero sporo leprša uzduhom, ali u oduljoj cijevi, iz koje je uzduh uklonjen, pada baš tako brzo kao i olovna kuglica (Newtonov pokus, sl. 16.). Međutim kad je prorez puta, što ga sebi tijelo mora krčiti kroz uzduh. malen, a težina tijela velika, utjecaj je uzduha na padanje neznatan. Tako isto ako na vodoravnu kovnu pločicu (komad novca) položimo nešto manji komad papira i ploču pustimo padati, papir ne će za pločom zaostati.

Mnogo je vijekova vrijedila nauka Aristotelova ('Αριστοτέλης 330. pr. Kr.), da teško tijelo pada brže nego li lako. (Po Aristotelu tjelesa bi padala jednako samo u praznom prostoru, a praznog prostora nema.) Potanko je objasnio zakone prostoga pada Galilei (poč. 17. vijeka[1]).


Sl. 16.

Budući da tijelo prosto padajući u kratko vrijeme prevali velik put, nije lako ispitivanje toga gibanja. Istražit ćemo zato koje drugo gibanje, koje je srodno s prostim padom, a zbiva se sporije. Takvo je gibanje na Atwoodovu padostroju (1784.). Kotač sa žlijebom ili „kolotura“ može se vrtjeti oko vodoravne osi; na krajevima konca, koji je kroz žlijeb preko koloture položen, vise jednaki utezi. Oba uteza drže sebi ravnotežu t. j. utezi i kolotura miruju ili se po zakonu ustrajnosti giblju približno jednoliko (ako su zapreke od trenja osi i t. d. neznatne). Ako se na jedan utez doda malen preteg i zgodnim podlogom spriječi gibanje, a onda podlog ukloni, težina će pretega staviti uteze i koloturu u sve brže gibanje. To je gibanje iste vrste kao i prosti pad, jer jedno i drugo gibanje nastaju zbog težine dakle djelovanjem stalne sile. Što na padostroju preteg sporije pada, dolazi otuda, što njegova težina ima pokretati i uteze i koloturu i sam preteg, dok bi preteg prosto padajući stavljao u gibanje samo sebe. — Padostroj ima vertikalnu ljestvicu, kojom se mjeri dubljina pada, a kod pokusa treba još i sprava, koja odbija jednake — prema potrebi odabrane — dijelove vremena (na pr. „metronom“ § 68.).

Ako su kolotura, utezi i preteg tako odabrani, da preteg prevali u 1. sek 5 cm, pa ako je vrijeme padanja t sek, a dubljina pada s cm, zakon padanja glasi:

$$s = 5\,t^2.$$

[1]) U djelu „Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze . . . .“ (= „Razgovori i matematički dokazi o dvjema novima naukama, koje se tiču mehanike i gibanja“) 1638.

Značenje te formule razabira se iz skrižaljke, kojoj su brojevi drugoga stupca izračunani prema formuli, a valjanost se njihova iskustvom potvrđuje.

t	s
0 sek	$5 \times 0^2 =$ 0 cm
1	$5 \times 1^2 =$ 5
2	$5 \times 2^2 =$ 20
3	$5 \times 3^2 =$ 45
4	$5 \times 4^2 =$ 80
5	$5 \times 5^2 = 125$
. . .	. . .

Zakon padanja izriče se i ovako: putovi su razmjerni kvadratima vremena.

Ima zamršenijih sprava, kojima se može i sam prosti pad ispitati. One pokazuju, da je (u našim krajevima) formula prostoga pada

$$s = 490\,t^2 \qquad (s \text{ cm}, t \text{ sek}).$$

Prema tome tijelo u prostom padu stigne u 1. sek do dubljine $490 \times 1^2 = 490$ cm $\doteq 5$ m.

Galilei je istraživao padanje niz kosinu.

Zakon padanja može se još drugačije izraziti. Prosto padanje ili padanje na padostroju ili kosini dano je zakonom

$$s = \alpha\, t^2.$$

Prema tomu su zakonu

u vremenima	1,	2,	3,	4,	5	. . . sek
prevaljeni putovi	α,	4α,	9α,	16α,	25α,	. . . cm.

Otuda odbijanjem izlazi, da su

u	prvoj,	drugoj,	trećoj,	četvrtoj,	petoj	. . . sek
prevaljeni putovi	α,	3α,	5α,	7α,	9α	. . . cm.

Ti putovi stoje u istim omjerima kao i lihi brojevi 1 : 3 : 5 : 7 : 9 : . . (Leonardo da Vinci, potkraj 15. vijeka.)

Zad. 8. Koliko treba vremena, da kamen padne 100 m duboko?

16. Brzina kod prostoga pada. Kod jednolikoga se gibanja dobila brzina dijeleći komad puta Δs s vremenom Δt; pri tome izašla je vazda ista veličina c, za kojigod se komad puta taj račun izveo. Ako se jednak račun izvodi kod prostoga pada ili kojeg drugog gibanja, koje nije jednoliko, dobit će se za različite komade puta različiti količnici $\Delta s : \Delta t$; vrijednost toga količnika zove se sada „srednja brzina u razdoblju Δt ili na putu Δs“. Na pr. ako željeznica prevali put Rijeka—Zagreb t. j. 228 km u $5^1/_2$ sati, srednja joj je brzina na tom putu $228 : 5^1/_2 = 41$ km/sat. Taj nam broj ništa ne kazuje o tome, da željeznica negdje ide brže drugdje sporije, da na postajama stoji i t. d. Što bolje želimo opisati gibanje željeznice, to manje treba uzeti razmake vremena Δt, za koje određujemo srednje brzine. Srednja brzina u vrlo malenom razdoblju, što obuhvata neki čas t, zove se naprosto „brzina u času t“. (Prema nazivlju infinitezimalnoga računa brzina je derivacija puta s po vremenu t.)

Ako tijelo pada u skladu sa zakonom $s = \alpha t^2$, bit će u čas t_1 put $s_1 = \alpha\, t_1^2$, a u čas t_2 put $s_2 = \alpha\, t_2^2$. U razdoblju $\Delta t = t_2 - t_1$ prevaljen je put $\Delta s = s_2 - s_1 = \alpha\, t_2^2 - \alpha t_1^2$. Srednja je dakle brzina u tom razdoblju $\Delta s : \Delta t = \alpha\,(t_2 + t_1)$. Ako se čas t_2 i t_1 gotovo podudaraju, pa

ih zato bilježimo istim znakom t, izlazi srednja brzina za maleno razdoblje t. j. brzina u času t jednaka $\alpha (t_2 + t_1) = 2 \alpha t$. Najposlije ako se brzina bilježi znakom v, bit će

$$v = 2 \alpha t.$$

Prema tome je na kraju nulte, prve, druge, treće, četvrte . . . sek
brzina 0, 2α, 4α, 6α, 8α . . .
Brzina dakle raste „jednoliko" s vremenom; gibanje je „jednoliko ubrzano". Veličinu 2α bilježit ćemo kratko sa a; ona se zove ubrzanje ili akceleracija (lat. *accelero, pospješujem*), a kazuje, koliko naraste brzina u 1 sek. Zakon za put i za brzinu glase sada

$$s = \frac{a t^2}{2}, \qquad v = a t.$$

Iz prve od tih formula dobiva se akceleracija dijeleći dvostruki put s kvadratom vremena; zato se jedinica ekceleracije bilježi cm/sek², km/sat² i t. d. Akceleracija prostog pada zove se akceleracija teže i bilježi se slovom g, Na površini je morskoj na mjestu geogr. širine 46° g = 980·7 cm/sek² (= 9·807 m/sek²), na ekvatoru 978·6, na širini **45° 980·629,** na polovinama 983·2.

Brzina je padanja razmjerna vremenu. Isprva se pomišljalo i na to, da je možda brzina razmjerna putu; to bi bilo matematički slično zakonu, po kojemu raste glavnica u štedionici, gdje je brzina porasta glavnice dvostruka, ako je glavnica dvostruka. No kako se glavnica 0 u štedionici ne može povećati, tako prema ovakovom zakonu brzine ne bi ni dubljina pada tijela nikada narasla nad početnu vrijednost $s = 0$.

Eliminacijom vremena t iz formula za s i v dobiva se sveza između brzine v i puta s:

$$v^2 = 2 a s.$$

Zad. **9.** Tijelo padajući stigne 1 dm duboko; kolika mu je brzina?

Zad. **10.** Do koje bi dubljine tijelo na Suncu palo u 1 sek, ako je tamo akceleracija teže 28 puta veća nego li na Zemlji?

17. Pojam mase. I. Teška masa. Ako su dva komada zlata A i B jednako teška (§ 8.), pripisujemo im jednaku vrijednost. Pretpostavljamo pri tome, da smo im težine odredili na istom mjestu Zemlje, na pr. u Parizu. Prenesemo li zlato B na Sjeverni pol, težina mu se povećala, tako da težine tjelesa A i B nisu više jednake, premda im je vrijednost ostala ista. Kažemo, da tjelesa imadu jednake mase. Masa je prema tome veličina karakteristična za tijelo: ona određuje težinu tijela, ali je ne određuje sama, već je za težinu odlučno i mjesto, na kojem se tijelo nalazi. Važemo li tjelesa sva na istom mjestu Zemlje, reći ćemo, da dvostrukoj težini odgovara dvostruka masa, trostrukoj težini trostruka i t. d., ukratko: masa je razmjerna s težinom. Tako određen pojam mase zove se „teška" masa. (Lat. *massa, tijesto, grúda*).

II. Troma masa i Newtonov II. aksiom. Neka je na lijevom utezu padostroja preteg 1 gram, a na desnom preteg 3 grama. Onda preteže desna strana, te se utezi (i kolotura) giblju jednoliko ubrzano zbog djelovanja sile 3 — 1 = 2 g*. Premjesti li se preteg 1 gram s lijeve strane na desnu, djeluje sila 3 + 1 = 4 g*, t. j. sila je 2 puta veća negoli prije. Mjereći putove nalazimo, da je sada i akceleracija 2-struka. U oba se primjera ista tvar gibala, pa izlazi, da su akceleracije a nekoga tijela razmjerne silama p, koje na tijelo djeluju. U formuli:

$$p = m a,$$

gdje je m konstanta razmjernosti. Newtonov II. aksiom.

Primjer. Težina tijela p razmjerna je akceleraciji teže g, dakle $p = mg$. Ako tijelo na ekvatoru ima težinu 1 g* bit će na polu teško $1 \cdot \frac{983 \cdot 2}{978 \cdot 6} = 1 \cdot 005$ g* (isp. brojke za g u predašnjem §).

Sile, što redom djeluju na neko tijelo, mogu se mjeriti jedna drugom, ako odredimo akceleracije, što ih sile izvode. Takvo mjerenje sila zove se „dinamičko". (Isp. „statičko" mjerenje u § 8.)

Neka na padostroju jedamput vise utezi po 70 grama, drugi put utezi po 200 grama; preteg neka u oba primjera ima težinu 2 g*. Kako u oba primjera djeluje jednaka sila p, a u drugom je primjeru akceleracija a manja, izlazi po gornjoj formuli, da je u drugom primjeru konstanta razmjernosti m veća. Tu konstantu zovemo i opet masom, pa možemo reći, da zadana sila daje tijelu velike mase malenu akceleraciju, a tijelu malene mase veliku akceleraciju. Ili: kraj stalne sile mase su obrnuto razmjerne akceleracijama. Veličina tako određena zove se „troma" masa.

Primjer. Ako uz akceleraciju teže 980·6 cm/sek² tijelo ima težinu 1 g*, onda mu je po formuli $p = m a$ masa $m = 1 : 980 \cdot 6$.

Budući da se teška masa određuje prema težini, a troma masa ispitivanjem akceleracije, treba te dvije veličine u prvi mah dobro razlikovati. Međutim pokazat ćemo, da se te veličine podudaraju. Vidimo to ovako. Kod prostog je pada akceleracija za sva tjelesa jednaka, u našim krajevima 980·6, pa imamo prema gornjoj formuli

$$m \times 980 \cdot 6 = p,$$

gdje je p težina tijela, m njegova troma masa. Ta nam formula dakle kazuje, da je i troma masa razmjerna težini tijela, te se ona prema tome ne razlikuje od teške mase.

18. Zakon protusile. Utez miruje na podlozi, jer ga podloga pritiskuje silom, koja je jednaka i protivna težini (§ 9.). To je primjer za „zakon protusile", koji veli, da je sili jednaka i protivna protusila. (Newtonov III. aksiom.) Znatna je primjena toga zakona kod privlačenja nebeskih tjelesa. Ako tijelo A privlači sasvim jednako tijelo B

silom p tona*, privlačit će se i tijelo A od tijela B silom p tona*. Kad bi se tijelu A dodalo jednako tijelo B, privlačilo bi tijelo sastavljeno od A i B tijelo R silom $2p$ tona*; no i obratno, tijelo bi R vuklo svaki dio sastavljenoga tijela silom p, dakle sastavljeno tijelo silom $2p$. Prema tome očekujemo, da veliko tijelo privlači maleno onolikom silom, kolikom maleno vuče veliko. Ako Zemlja vuče kamen silom 5 kg*, onda i kamen vuče Zemlju silom 5 kg*. Na to se obično ne pomišlja, jer je masa Zemlje toliko veća od mase kamena, da akceleracija, kojom Zemlja pada prema kamenu, nije ni spomena vrijedna.

19. Dinamički sustav mjera. Dosele smo silu mjerili na g* (kg*, tone* i t. d.), a masu smo određivali dijeleći silu s akceleracijom, te jedinica mase nije imala osobitoga imena. To je „tehnički" sustav mjera, a upotrebljava se osobito u starijim granama tehnike ili primijenjene znanosti (grč. τέχνη, *umijeće*). U čistoj znanosti i u elektrotehnici običniji je t. zv. dinamički sustav mjera. Ovdje se prije određuje jedinica mase, a onda jedinica sile. Jedinica je mase 0·001 mase međunarodnoga kilograma, a zove se 1 gram i bilježi „1 g" (bez zvjezdice!). Jedinica je sile 1 din (skraćeno prema grč. δύναμις); to je sila, koja masi 1 g daje akceleraciju 1 cm/sek². Ta je definicija u skladu s jednadžbom $p = m\,a$, jer kad amo uvrstimo silu 1, masu 1 i akceleraciju 1, izlazi valjano $1 = 1 \cdot 1$.

Pomišljajući na utez od 1 grama razabiramo, da sila (težina) 1 g* (tehnički sustav!) daje masi 1 g (dinamički sustav!) akceleraciju 980·6 cm/sek², dakle akceleraciju, koja je 980·6 puta veća negoli akceleracija, što nastane djelovanjem 1 dina. Prema tome je i sila

$$g^* = 980{\cdot}6 \text{ din.}$$

Točnije vrijedi:

$$\mathbf{1\ kg^* = 980\,665\ din.}$$

Ta je relacija utvrđena god. 1901., kada se držalo, da je akceleracija pada na 45° širine na površini morskoj (§ 8.) 980·665 cm/sek². Kada se pokazalo, da je ta akceleracija 980·62, zabačena je prva definicija kilogram-sile i pridržana gornja relacija kao nova definicija, te je prema tome 1 kg* težina uteza 1 kg na mjestima, gdje je akceleracija pada 980·665 cm/sek². Pregled naziva sadržan je u skrižaljci:

Sustav	sila	masa
tehnički	**gram***	—
dinamički	din	**gram**

Kada se u kemiji kaže, da je masa (težina) vodikova atoma 1·0078, dušikova 14·03 i t. d., uzimlje se za jedinicu mase (težine) $^1/_{16}$ mase (težine) atoma kisikova. Ta je kemijska jedinica sićušna prema 1 gramu, te je 1 gram $= 6{\cdot}03 \times 10^{23}$ kemijskih jedinica mase (težine).

Primjer. Na padostroju utez sa pretegom ima 86 grama i pada akceleracijom 12 cm/sek²; kolika je napetost konca? (geogr. širina 45°.) Težina vuče utez dolje, napetost konca gore. a rezultanta njihova izvodi akceleraciju uteza. Dakle je *napetost konca = težina — rezultanta.* Riješit ćemo zadaću na dva načina.

I.) Tehnički sustav mjera. — Težina je uteza 86 g*. Budući da bi ta sila utezu u prostom padu podjeljivala akceleraciju 981 cm sek², vrijedi za masu uteza m da je $86 = m \times 981$ dakle $m = 86 : 981$. Rezultanta daje toj masi ekceleraciju 12 cm/sek², ona je dakle $\frac{86}{981} \times 12$ g*. Prema tome je napetost konca $86 - \frac{86 \times 12}{981} = 84{\cdot}95$ g*.

II.) Dinamički. — Masa je uteza 86 g, težina 86×981 din. Sila, koja masi 86 daje akceleraciju 12 cm/sek², jest 86×12 din. Prema tome je napetost konca $86 \times 981 - 86 \times 12 = 83334$ din (= 84·95 g*).

Zad. **11.** Utez 10 grama nalazi se na ekvatoru; kolika mu je težina u dinima? kolika u g*?

Zad. **12.** Na padostroju, koji je na ekvatoru, jedan utez ide u vis akceleracijom 10 cm/sek²; kolika je napetost konca, ako utez ima 100 grama. [98860 din]

Zad. **13.** Vodoravan konac vođen preko koloture i nategnut utezom 50 grama pokreće na vodoravnim tračnicama kola od 1000 grama; kolika je akceleracija? (geogr. šir. 45.°) $\left[\frac{50 \times 981}{1000 + 50}\ \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}\right]$

20. Mjerenje mase i obujma. Masu određujemo dijeleći silu s akceleracijom, no ona se može odrediti i s pomoću obične vage. Vaga je u ravnoteži, ako su utezi u jednoj zdjelici toliko teški, kao i tijelo u drugoj zdjelici. No vaganjem ne saznajemo neposredno težinu tijela; prenese li se naime vaga na drugo mjesto Zemlje, težina se tijela promijeni, a ipak mu isti utezi drže ravnotežu kao i prije, jer se i težina uteza promijenila. Mase nisu podložene tima promjenama, te vidimo, da se običnom vagom uspoređuju upravo mase tjelesa.

Množina vode s masom 1 kg imade kod temperature 4° C i običnog tlaka uzduha obujam, koji se zove 1 litra (grč. λίτρα, lat. *libra*, mjera težine). Približno je

$$1 \text{ litra} \doteq 1 \text{ dm}^3,$$

točnije 1 litra = 1·000 027 dm³ = 1 dm³ 27 mm³. Prema tome se obujam šupljine vaganjem određuje ovako. Šupljina se ispuni vodom od 4° C, pa se vagom nađe masa vode u kg. Taj je način određivanja obujmova uopće točniji negoli geometrijski.

U najnovije se doba pokazalo, da iz vode možemo dobiti t. zv. tešku vodu, koja je od obične vode za $^1/_{10}$ teža, a ima je u običnoj vodi vrlo malo. U definiciji 1 litre trebalo bi dakle jasnije reći „množina obične vode", a ne naprosto „množina vode". No i uz tu dopunu definicija ne bi bila sasvim određena, budući da ni „obična" voda ne sadržaje svagdje u prirodi jednak dijelić teške vode, te nije svagdje baš sasvim jednako teška.

21. Gustoća i specifična težina. Ako tijelo u misli razdijelimo na mnogo jednakih obujmova, a pri svakom dijeljenju dijelovi imadu jednake mase, zove se tijelo homogeno (grč. ὁμογενής, *istovrstan*). Omjer mase

M i obujma V homogena tijela zove se **gustoća**; bilježimo je ρ, te je

$$\rho = \frac{M}{V}.$$

Ako se masa mjeri gramima, obujam kubičnim centimetrima, mjera je gustoće „gram u kubičnom centimetru“ ili g/cm³. Gustoća je vode kod 4° C

$$1 \text{ kg/litra} = \frac{1}{1{\cdot}000027} \text{ kg/dm}^3 \doteq 1 \text{ kg/dm}^3 = 1 \text{ g/cm}^3.$$

Gustoće nekih tvari kod 20° C pobilježene su u tablici:

platina	21·4 g/cm³	aluminij	2·6
živa	13·546	sumporna kiselina	1·8
olovo	11·3	voda	0·998
žuta mjed	8·4	alkohol	0·8
željezo	7·8	uzduh na površ. mora	0·0012.

Ako se težina P homogena tijela dijeli s obujmom V, dobije se „**specifična težina**“ (lat. *specificus, što je prema vrsti [species], odjelit*)

$$s = \frac{P}{V}.$$

Jedinice specifične težine jesu din/cm³, g*/cm³, kg*/litra i t. d.

Naziv „specifična težina“ nije zgodan. Specifična težina doduše kazuje, kolika je težina obujma 1; no ona nije neka vrst težine, baš kako ni brzina nije put, već nam samo kazuje, kolik je put prevaljen u vremenu 1.

Prema općem znanstvenom uvjerenju tvar je građena iz atoma, koji su jedan od drugoga razmaknuti. Točno uzeto nema dakle homogenih tjelesa, te pojam gustoće nema vrijednosti za **najsitnije** množine tvari.

Da se odredi gustoća (specif. težina) tijela, treba znati obujam njegov. Obujam u cm³ često se može odrediti tako, da se tijelo uroni u vodu od 4° C, pa se odvagne u gramima, koliko je vode tijelo istisnulo. Onda je gustoća (specifična težina) brojevno jednaka masi (težini) tijela podijeljenoj s masom istisnute vode.

Gustoća se tekućine određuje **piknometrom** (grč. πυκνός, *gust*). To je bočica, koja se odvagne prazna, a onda puna tekućine; time se sazna masa tekućine; onda se bočica napuni vodom (4° C) i odvagne, pa se dobije obujam tekućine. Dijeleći masu s obujmom dobivamo gustoću.

Zad. **14.** U tornju zagrebačke prvostolne crkve visi željezna kugla, kojoj najveći krug ima opseg 235 cm; kolika je težina kugle, ako je spec. težina željeza 7·8 kg*/dm³? [1·7 tona*]

Zad. **15.** Kolika je gustoća kocke, kojoj je masa 182·33 g a brid 2·71 cm? [9·16 g/cm³]

Zad. **16.** Zlatni novac načinjen je od zlata i bakra u omjeru masa 9 : 1; kolika mu je gustoća, ako je gustoća zlata 19·2 g/cm³, bakra 8·9? (obujam je slitine jednak zbroju obujmova sastojina). [17·2 g/cm³]

Zad. **17.** Arhimed je izračunao omjer zlata i srebra u Hieronovu vijencu tako, da je odredio obujam V vijenca i obujmove Z komada zlata i S komada srebra, koji svaki vagahu toliko, koliko i vijenac. Kolik je traženi omjer? [(V — S)/(Z — V)]

22. Padanje niz kosinu. Ako se tijelo mase m, dakle težine $U = mg$ stavi na glatku kosinu, kojoj je priklon φ, tjera ga niz kosinu sila $U \sin\varphi = mg \sin\varphi$, kako se razabira iz razmatranja § 11. Tijelo se skliže jednoliko ubrzano; akceleracija toga sklizanja izlazi dijeljenjem sile s masom dakle $a = mg \sin\varphi : m = g \sin\varphi$.

Ako je tijelo na kosini prevalilo put od A (sl. 8.) do B, brzina u točki B prema formuli $v^2 = 2 \times a \times s$ (§ 16.) slijedi iz jednadžbe $v^2 = 2 \times g \sin\varphi \times AB = 2g \times AB \sin\varphi = 2g \times AC$, gdje je AC visina pada. Isto bi se v^2 dobilo u točki C, da je tijelo prosto padalo od A do C. **Pada li tijelo prosto ili pada niz kosinu, u jednakim visinama ima jednake brzine.**

23. Vertikalni hitac. Ako iz neke točke tijelo bacimo prema dolje podijelivši mu „početnu“ brzinu c, tijelo će prosto padati kao da je brzinu c dobilo padajući iz jedne više točke. (**Vertikalni hitac prema dolje.**)

Ako tijelo u čas $t = 0$ pustimo iz točke A, ono će prosto padati u skladu s formulama (približno!) $s = 5\,t^2$ (metri, sekunde!) i $v = 10\,t$. Ako tijelo bacimo u vis, tako da se popne do točke A, ono će iz točke A padati kao i prije. Padanje je sada nastavak penjanja, pa oba gibanja zacijelo udovoljuju istom matematičkom zakonu, te formule prostoga pada vrijede i za penjanje; treba samo u te formule uvrštavati negativne vrijednosti t, jer se tijelo dizalo **prije** časa $t = 0$. Izilaze na pr.

u časovima	$t = \ldots$	$-0{\cdot}3$ sek	$-0{\cdot}2$	$-0{\cdot}1$	0	$+0{\cdot}1$	$+0{\cdot}2$	$+0{\cdot}3$	…
dubljine	$s = \ldots$	$+0{\cdot}45$ m	$+0{\cdot}2$	$+0{\cdot}05$	0	$+0{\cdot}05$	$+0{\cdot}2$	$+0{\cdot}45$	…
brzine	$v = \ldots$	-3 m/sek	-2	-1	0	$+1$	$+2$	$+3$	…

Razabiramo, da **tijelo treba za penjanje toliko vremena koliko za padanje**, a i to, da tijelo u kojojgod dubljini imade padajući toliku pozitivnu brzinu (t. j. brzinu prema dolje), koliku je negativnu brzinu (t. j. prema gore) imalo u toj dubljini, kad se dizalo.

Budući da kod penjanja tijela (**vertikalni hitac prema gore**) apsolutna vrijednost brzine opada, gibanje se zove **jednoliko usporeno**. Pri tome **protiv gibanja** djeluje sila teže dakle **stalna sila**.

Zad. **18.** Tijelo bačeno u vis popne se 8 m visoko; koliko će se vremena tijelo dizati? kolika je bila početna brzina? ($g = 9{\cdot}81$ m/sek²)

24. Općeniji pojam akceleracije. Formula $s = c\,t$ vrijedi za jednoliko gibanje, a jednoliko ubrzano gibanje opisano je formulom $v = a\,t$. Te su jednadžbe slične, pa ako kažemo, da je c brzina, kojom raste put, možemo reći i za akceleraciju a, da je „**brzina, kojom raste brzina**“. (I u običnom se govoru za različite veličine na pr. glavnicu, broj pučanstva i t. d. kaže, da rastu „brzo“, te se - tako kojegod promjene ispoređuju s gibanjem [**Aristotel**].) Kod gibanja, koje nije jednoliko, odredili smo srednju brzinu za razdoblje Δt i onda brzinu u čas t. Sasvim se slično određuje kod

gibanja, koje nije jednoliko ubrzano, srednja akceleracija i akceleracija u čas t. Srednja je akceleracija u razdoblju Δt dana formulom

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t},$$

gdje je Δv porast brzine u tom razdoblju. Uzimajući Δt sve sitnije, dobiva se a k c e l e r a c i j a u č a s t.

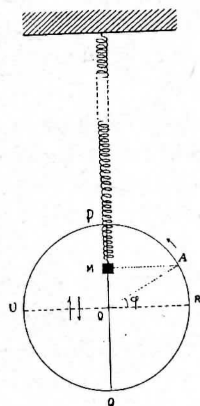
Za Newtonov II. aksiom $p = m\,a$ treba uzeti, da vrijedi i onda, kad se sila mijenja, te akceleracija a nije stalna.

Zad. **19.** Tane izleti iz topa brzinom 523 m/sek, put u cijevi trajao je 0·01 sek; kolika je srednja ekceleracija taneta u topovskoj cijevi? [52 300 m/sek^2]

25. Padanje u uzduhu. O t p o r u z d u h a stoji do veličine i oblika tijela, a i do njegove brzine. Ako dvije jednako velike kugle s masama 200 g i 2 g bacimo jednakim početnim brzinama vertikalno dolje, bit će u prvi mah otpor uzduha q dina za obje kugle jednak. Težu kuglu vuče sila $200 \times 981 - q$ dina, laglju sila $2 \times 981 - q$ dina. Ako se sile podijele s masama, dobiju se akceleracije. Dakle je akceleracija teže kugle $981 - q/200$, lakše kugle $981 - q/2$. Prvi je od tih izraza veći, dakle teža kugla pada većom akceleracijom nego li lakša.

S porastom brzine tijela raste i otpor uzduha. U nekoj dubljini otpor će dostići težinu tijela, pa će joj držati ravnotežu. Onda tijelo pada jednoliko. Kapljica kiše sa promjerom 1 mm imade brzinu 4·4 m/sek, kapljica s promjerom 5 mm (dakle 125 puta teža kapljica) pada brzinom 8·0 m/sek. — U jednom se primjeru odredilo, da tane iz puške u vertikalnom hicu zbog otpora uzduha umjesto visine 10 km dostigne jedva 600 m, a povrati se s brzinom, koja je samo $1/9$ početne brzine.

26. Jednostavno titranje. Kad se tijelo giblje komadom pravca amo tamo, kažemo, da titra. Od svih se gibanja ove ruke formulom najlakše predočuje j e d n o s t a v n o titranje. Pomoćna točka A neka se giblje jednoliko obodnicom kruga (sl. 17.); okomicom AM projicirajmo točku A na promjer PQ; gibanje projekcije M zove se jednostavno titranje (B e n e d e t t i 1585.). Vrijeme, u kojemu točka A opiše obodnicu, a točka M 2 puta prevali promjer PQ, zove se v r i j e m e 1 t i t r a j a ili p e r i o d a (grč. περίοδος, *ophod)* i bilježi sa T.



Sl. 17.

Formula za jednostavno titranje. Razmak točke M od središta njezine staze O zove se e l o n g a c i j a i bilježi se slovom s. Najveća vrijednost S toga razmaka zove se z a m a h ili a m p l i t u d a (lat. *amplitudo, širina*); ona je jednaka polumjeru kruga. φ neka je kut, što ga čini polumjer OA sa polumjerom OR, koji je okomit na promjeru PQ. Iz slike izlazi;

$$OM = OA \cdot \sin\varphi \text{ ili } s = S \cdot \sin\varphi.$$

U čas $t = 0$ neka pomoćna točka prođe kroz R, u času t neka stigne u A. Vremenu t pripada dakle središnji kut φ, dok bi u vremenu T bio opisan središnji kut 360^0. Prema tome postoji razmjer

$$\varphi : 360^0 = t : T.$$

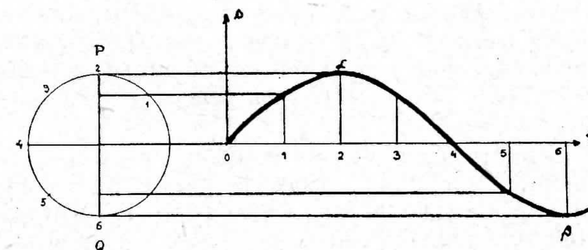
Ako se dakle odredi φ i uvrsti u pređašnju formulu, dobiva se matematički zakon jednostavnoga titranja

$$s = S \sin\left(360^0 \cdot \frac{t}{T}\right).$$

Ta formula kaže, da časovima

$$t = 0,\ \tfrac{1}{4}T,\ \tfrac{1}{2}T,\ \tfrac{3}{4}T,\ T,\ 1\tfrac{1}{4}T,\ 1\tfrac{1}{2}T,\ 1\tfrac{3}{4}T,\ 2T, \ldots$$

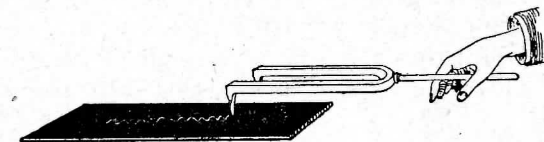
pripadaju elongacije $s = 0,\ +S,\ 0,\ -S,\ 0,\ +S,\ 0,\ -S,\ 0, \ldots,$ gdje je značenje negativnih predznakova u prvi mah jasno.



Sl. 18.

U sl. 18. jednostavno je titranje predočeno grafički (vremena su apscise, elongacije ordinate). Točke 0, 1, 2, 3, 4, . . . slijede u jednakim razmacima vremena. Jednostavno titranje duž pravca PQ grafički je predočeno „s i n u s o i d o m“ $0\alpha4\beta$.

Kad titra glazbena viljuška, točke se njezine obično giblju po zakonu sinusoide. O tome se možemo uvjeriti, ako viljušku, na kojoj je učvršćeno perce, jednoliko vučemo uz počađenu ploču, tako da perce samo bilježi sliku svoga titranja. (Sl. 19.)



Sl. 19.

Iz namještaja točaka 0, 1, 2, 3, . . . na promjeru PQ vidimo, da je brzina kod jednostavnoga titranja najveća na sredini puta; na krajevima P i Q brzina mijenja predznak, te je u krajnjim točkama brzina $= 0$. Formula se za brzinu dobiva prema naputku na poč. § 16., a rezultat je matematičkoga izvođenja:

$$v = \frac{2\pi}{T} S \cos\left(360^0 \cdot \frac{t}{T}\right).$$

Akceleracija se određuje, kako je objašnjeno u § 24.; izlazi

$$a = -\frac{4\pi^2}{T^2} \cdot s.$$

Kad je s pozitivno, t. j. kad je u sl. 17. točka M na gornjoj strani svoje staze, a je negativno, t. j. akceleracija je uperena dolje. Dok se točka

giblje od O prema P, gibanje je dakle usporeno; kad se vraća od P do O gibanje je ubrzano. Kad je s negativno, akceleracija je pozitivna.

Sila kod jednostavnoga titranja. Sila p, što podržava jednostavno titranje, dobiva se, ako množimo masu m tijela M s akceleracijom a, te je

$$p = -\frac{4\pi^2 m}{T^2} \cdot s.$$

Ta jednadžba kaže, da sila ima smjer obrnut smjeru elongacije; sila dakle vazda vuče tijelo prema sredini njegova puta. Nadalje sila je razmjerna elongaciji, tako da je omjer njihov stalan.

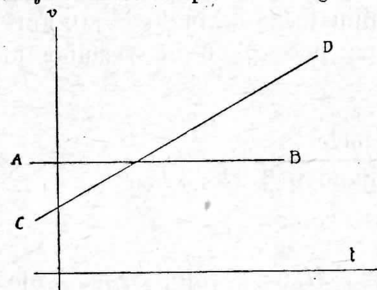
Primjer za jednostavno titranje jest gibanje uteza M (sl. 17.), koji je obješen na elastičnoj uzvojnici, a titra u vertikalnom pravcu PQ. To se gibanje podržava silom, koja je rezultanta težine uteza i elastične napetosti uzvojnice. Ako titranje zaustavimo, elastična sila drži ravnotežu težini; utez je onda u „položaju ravnoteže" O, sila $p = 0$. Da se nađe sveza sile p i elongacije, dodajmo ili oduzmimo utezu M težinu p i odredimo, u kojoj će se elongaciji od točke O utez primiriti. Iskustvo pokazuje, da je doista p razmjerno sa s.

Utez na uzvojnici može titrati s manjim ili većim amplitudama. Kako je omjer $p : s$ stalan, izlazi iz gornje formule, da je i vrijeme titraja T stalno. Vrijeme titraja ne zavisi o amplitudi; titraj velikoga zamaha traje jednako dugo kao i titraj malenoga zamaha; kažemo, da su titraji izohroni (grč. ἴσος, *jednak*; χρόνος, *vrijeme*).

Primjer. Na uzvojnici visi utez težak 5 kg*; kad bi se dodalo još 5 kg, uzvojnica bi se produljila još za 3·8 cm; koliko je vrijeme titraja? Budući da je 5 kg* = 5000 × 981 din, to je omjer $p : s = -5000 \times 981 : 3{\cdot}8$ din/cm; dalje je $m = 5000$ g, tako da iz gornje formule slijedi $T = 2\pi \sqrt{3{\cdot}8 : 981} = 0{\cdot}39$ sek. Pokusom se nađe vrijeme titraja T tako, da se odredi vrijeme, što treba za oveći broj titraja (na pr. vrijeme 50 T), i to vrijeme podijeli s brojem titraja.

Račun taj vrijedi samo onda dosta točno, ako masa uzvojnice nije baš velika, te ne trebamo na nju paziti. — Treba još i to dodati, da je jednostavno titranje periodsko gibanje, koje nema kraja; no pustimo li da utez na uzvojnici titra, zamasi se titraja postepeno umanjuju, dok se najposlije utez umiri. Razlog su tome unutarnje trenje u uzvojnici i otpor uzduha.

Zad. 20. Kad bi u Zemlji težina tijela bila razmjerna udaljenosti od središta zemaljskoga, te kad bi se moglo tijelo spustiti u zrakoprazan rov, izduben duž promjera zemaljskoga, tijelo bi izvodilo jednostavno titranje; koliko bi vremena tijelo trebalo s jednoga kraja rova do antipoda i natrag? [84 min]



Sl. 20.

27. Grafički prikaz brzine. U nekim je primjerima zgodno, da se gibanje grafički predoči ovako. U pravokutnom se koordinatnom sustavu nanose vremena t kao apscise, a brzine v kao ordinate. Po dvije vrijednosti t i v, što pripadaju jedna drugoj, daju jednu točku ravnine. Krivulja sastavljena od tih točaka prikazuje zakon brzine. Ima sprava (na pr. na automobilima), koje automatično bilježe krivulju brzina. Jednoliko je gibanje u takvoj crtnji (Sl. 20.) predočeno pravcem AB usporednim s osi apscisnom (brzina stalna!); kosi pravac CD znači jednoliko ubrzano gibanje. Što je strmija crta, koja predočuje brzinu, to se brže brzina mijenja, to veća je akceleracija; priklon crte brzina upravo prikazuje akceleraciju.

28. Veličina gibanja. Umnožak mase tijela m g i brzine njegove v cm/sek zove se veličina gibanja $m \cdot v$.

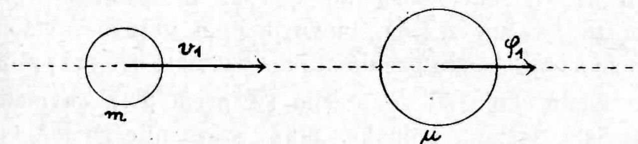
Kada dva tijela djeluju silama jedno na drugo, mijenjaju se brzine njihove, ali

zbroj veličina gibanja ne mijenja se.

Zamislimo na pr. dva nebeska tijela, koja bi bila sama u Svemiru, a gibala bi se u istom pravcu (sl. 21.). Masa jednoga tijela neka je $\mathbf{m}$, masa drugoga μ, a u odabrani čas neka je brzina prvoga tijela $\mathbf{v}_1$, brzina drugoga φ_1. Budući da se zvijezde — prema Newtonovoj nauci — privlače, mijenjale bi se brzine, pa ako bi bile u kojigod drugi čas $\mathbf{v}_2$ i φ_2, vrijedila bi jednadžba

$$\mathbf{m}\,\mathbf{v}_2 + \mu\,\varphi_2 = \mathbf{m}\,\mathbf{v}_1 + \mu\,\varphi_1.$$

Taj zakon veličina gibanja može se izvesti iz Newtonovih aksioma. Kad ga primjenjujemo, treba paziti na predznakove brzina, tako da se sve brzine jednoga smjera uzmu pozitivne, a brzine protivnoga smjera negativne. U tom je griješio Descartes, koji je prvi taj zakon iznio (g. 1644.).



Sl. 21.

Drugi primjer: tane i top. Kad tane izleti iz topa, top otskoči. Isprva je brzina φ_1 taneta i brzina v_1 topa $= 0$. Ako je masa taneta μ, masa topa m, a tane izleti iz cijevi brzinom v_2, top će otskočiti brzinom φ_2, koja se izračunava iz jednadžbe $m\,v_2 + \mu\,\varphi_2 = 0 + 0$ ili $\varphi_2 = -\,m\,v_2 : \mu$. Budući da je $m > \mu$, bit će — bez obzira na predznak — $\varphi_2 > v_2$; dakle top dobije manju brzinu negoli tane.

29. Sraz neelastičnih kugala. Središta dviju kugala, kojima su mase m i μ, giblju se na istom pravcu jednoliko brzinama v_1 i φ_1 (sl. 21.). Brža kugla stigne sporiju, te nastane „sraz"; pri tome se brzine u kratak čas promijene, pa se pita, kolike su brzine v_2 i φ_2 poslije sraza. Rezultat uvelike stoji do tvari, od koje su kugle.

Kugle se u srazu jedna drugu pritiskuju silama, koje su jednake i protivne. Zbog pritiska svakoj se kugli mijenja oblik, te se površina kugle na dotačištu malko ulekne. Mijenjanje oblika traje svakako bar dotle, dok brzine središta kugala ne budu jednake. Imade tjelesa, koja se promjenom svoga oblika tako reći zadovolje, te najposlije u doticaju nastave izobličena svoje gibanje zajedničkom brzinom. Takva se tjelesa zovu „neelastična“. Njihove se brzine $v_2 = \varphi_2$ poslije sraza izračunaju iz zakona veličina gibanja, dakle $m v_2 + \mu v_2 = m v_1 + \mu \varphi_1$, što daje

$$v_2 = \varphi_2 = \frac{m v_1 + \mu \varphi_1}{m + \mu}.$$

Primjeri. Ako su brzine prije sraza protivnoga smjera i obrnuto razmjerne masama, te je $\mu : m = - v_1 : \varphi_1$, izlazi $v_2 = \varphi_2 = 0$.

Ako je m mnogo puta veće od μ, dobiva se

$$v_2 = \varphi_2 = \frac{v_1 + \frac{\mu}{m}\varphi_1}{1 + \frac{\mu}{m}} = \frac{v_1 + 0}{1 + 0} = v_1,$$

t. j. velika kugla srazom ne promijeni svoje brzine.

Zad. **21.** Nebesko tijelo giblje se brzinom 30 km/sek, na nj naleti suprotnim smjerom tijelo 10-struke mase sa brzinom — 20 km/sek; kolika je brzina tijela, što je srazom nastalo? [— $15^5/_{11}$ km/sek]

30. Sraz elastičnih kugala. Ako se tijelo, koje se djelovanjem kakvih sila izobličilo, sasvim povrati u prvobitni oblik, kad sile prestanu djelovati, zove se ono „savršeno elastično“ (novolat. *elasticus*). Zapravo nema ni neelastičnih ni savršeno elastičnih tjelesa, ali ih ima, koja su gotovo neelastična na pr. vlažna zemlja, olovo ili opet gotovo savršeno elastična na pr. čelik, pa se na njih mogu primijeniti razmatranja ovoga i pređašnjega §-a.

Neka su kugle, koje su se srazile (v. pređ. § !), savršeno elastične. Kad brzine središta postanu jednake, pojav sraza nije se još svršio. Kugle su izobličene, te nastoje da se vrate u prvobitni oblik.

Središta se razmiču. Najposlije prestane doticaj kugala, te se one više ne pritiskuju. Od toga časa kugle se udaljuju jedna od druge onoliko brzo, koliko brzo su se prije sraza jedna drugoj približavale. Ako je u sl. 21. $v_1 > \varphi_1$, brzina je približavanja $v_1 - \varphi_1$ (zašto?). Poslije sraza je onda $\varphi_2 > v_2$, a brzina udaljivanja $\varphi_2 - v_2$. Vrijedi dakle formula (Huygens 1668.)

$$\varphi_2 - v_2 = v_1 - \varphi_1 .$$

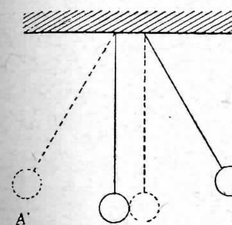
Iz te formule i zakona veličina gibanja

$$\mu \varphi_2 + m v_2 = \mu \varphi_1 + m v_1$$

mogu se izračunati nepoznanice φ_2 i v_2.

Brzine približavanja ili udaljivanja zovu se jednim imenom relativna brzina.

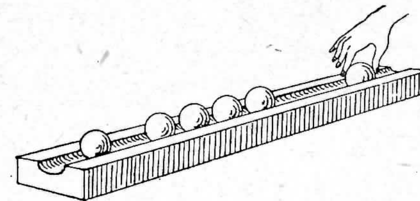
Primjeri. Ako su mase kugala jednake, $\mu = m$, druga se jednadžba skraćuje sa m, te glasi $\varphi_2 + v_2 = \varphi_1 + v_1$. Rješidba je $\varphi_2 = v_1$, $v_2 = \varphi_1$, t. j. kugle srazom izmijene svoje brzine. — To se može potvrditi sa čeličnim kuglama, koje kao njihala vise jedna tik druge (sprava Mariotteova 1677.). Na pr. ako jedna kugla miruje u položaju A (sl. 22.), te je brzina $v_1 = 0$, a druga kugla B u njihanju udari u prvu, nakon sraza mirovat će druga kugla i to u položaju B', dok će prva kugla primiti pređašnju brzinu kugle B i zanjihati se do položaja A', koji je jednako visok kao i početni položaj kugle B. Nešto se slično opaža, ako na glatkom stolu leži komad novca, pa u nj udari jednak drugi novac, koji smo prstom kvrcnuli.



Sl. 22.

Neka je masa μ mnogo puta veća od mase m; ako jednadžbu veličina gibanja skratimo sa μ, dobivamo $\varphi_2 + 0 \doteq \varphi_1 + 0$, dakle se brzina velike kugle nije promijenila. Zakon relativnih brzina sada glasi $\varphi_1 - v_2 = v_1 - \varphi_1$, tako da je $v_2 = 2\varphi_1 - v_1$. Ako je prije sraza brzina male kugle = dvostrukoj brzini velike kugle, t. j. $v_1 = 2\varphi_1$, bit će poslije sraza brzina male kugle $v_2 = 0$. — Kad elastična kugla udari okomito na elastičnu ploču, možemo ploču smatrati kao dio vrlo velike kugle. Elastična kugla udarivši okomito o mirnu elastičnu ploču odbije se s jednakom brzinom; ako ploča dolazi kugli u susret, brzina je kugle poslije sraza veća negoli prije sraza; ako ploča pred kuglom uzmiče, brzina se kugle srazom umanji.

Sraz traje obično samo kratko vrijeme na pr. nekoliko 0·0001 sek. — Da se kugla u srazu izobliči, može se još i poslije utvrditi, ako pustimo, da kugla padne na horizontalnu počađenu ploču. Na kugli ostane okrugao trag. Taj je krug to veći, što je veća bila visina, iz koje je kugla pala. — Zakoni sraza u igri biljar jesu zamršeniji, jer se tamo kugle još i vrte. — Nekoliko sasvim jednakih elastičnih kugala neka je poređano u vodoravnom žlijebu, te se tiču bez tlaka (sl. 23.); ako u žlijebu udari na jedan kraj niza još jedna kugla iste vrste, s drugoga će se kraja jedna kugla odbiti, dok će sve ostale ostati na miru.



Sl. 23.

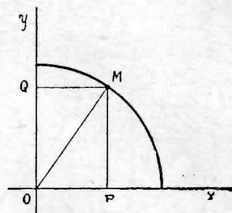
Zad. **22.** Čelična kugla s masom 1 kg udari s brzinom 1 m/sek u mirnu kuglu mase 1 g; kojom će brzinom potonja kugla poletjeti? [1·998 m/sek]

Zad. **23.** Elastična kugla udari sa brzinom 1 m/sek u drugu, mirnu kuglu, kojoj je masa polovica mase prve kugle; druga kugla udari u mirnu treću kuglu, kojoj je masa polovica mase druge kugle; i t. d. sve do 11. kugle, koja je posljednja; kolika je najposlije brzina 11. kugle? (Po Huygensu.) [17·8 m/sek]

Zad. **24.** Atom helijev imade 4 puta veću masu od atoma vodikova. Kolikom će brzinom atom vodikov poletjeti, ako u nj „centralno“ udari atom helijev sa brzinom v? [brzinom 1·6 v; Marsden 1914.]

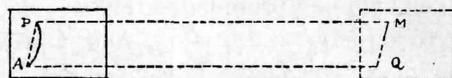
c) Dinamika krivocrtnoga gibanja

31. Sastavljanje putova. Neka se tijelo M (sl. 24.) giblje u ravnini; projicirajmo točku, u kojoj je tijelo, na osi pravokutnoga koordinatnoga sustava; projekcije P i Q određuju onda mjesto tijela. Ako je poznato gibanje točke P u apscinoj osi i gibanje točke Q u ordinatnoj osi, poznato je gibanje tijela samoga. Pri tom treba crtati „paralelogram putova" $OPMQ$, gdje su OP apscisa tijela, OQ ordinata njegova. Primjer: Ako se tijelo giblje jednoliko u kružnici, može se reći, da istodobno izvodi dva gibanja i to jednostavno titranje u smjeru osi apscisa i jednostavno titranje u smjeru osi ordinata.



Sl. 24.

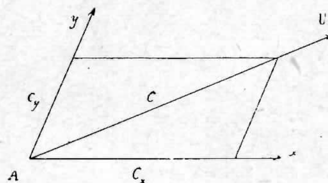
Kod željezničkih kola, koja se giblju na ravnoj pruzi, sve točke izvode jednako gibanje; takvo se gibanje zove usporedna translacija (drugi primjer: gibanje ladice, koju vučemo iz ormara). Ako čovjek u kolima prevali kredom označeni put AP (sl. 25.), a kola se u isto vrijeme usporednom translacijom pomaknu za put $= AQ$, čovjek će na kraju toga vremena biti u točki M, koja se dobije crtnjom paralelograma $APMQ$.



Sl. 25.

Zad. 25. Vlakovođa prođe željezničkim vlakom dugim 120 m od početka do kraja, a u isto vrijeme vlak prevali 6 km; kolik je put vlakovođa prevalio s obzirom na zemlju?

32. Sastavljanje brzina. Ako se tijelo giblje jednoliko u pravcu AU (sl. 26.), pa s pomoću paralelograma putova gibanje rastavimo u gibanje duž pravca Ax i gibanje duž pravca Ay, lako se pokazuje, da su i komponentna gibanja jednolika; brzina C rezultantnoga gibanja dobiva se iz brzina komponentnih gibanja C_x i C_y po zakonu paralelograma brzina (Aristotel). — Ako se tijelo giblje u krivulji, kažemo, da se smjer brzine svagdje podudara sa tangentom krivulje. Kako se može za malen dio krivulje uzeti, da je komadić pravca i da se u njemu tijelo giblje jednoliko, može se brzina gibanja u krivulji također rastaviti u komponente po zakonu paralelograma.



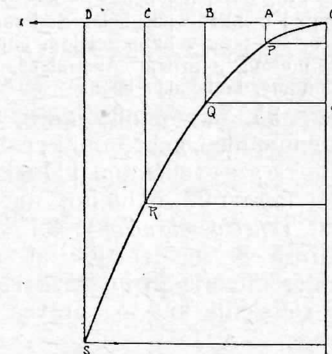
Sl. 26.

Zad. 26. Plivač hoće da prepliva rijeku tako, da stigne na najbližu točku druge obale; kojim smjerom treba da pliva, ako je brzina plivača = dvostrukoj brzini rijeke?

Zad. 27. Brod se giblje prema zapadu brzinom 10 m/sek, vjetar prema jugu brzinom 7 m/sek. Kakav se pričinja smjer vjetra čovjeku na lađi?

Zad. 28. Na jednoj izložbi uz nepomičan se hodnik jednoliko gibao brzinom 1·1 m/sek drugi hodnik, do njega u istom smjeru treći, koji je bio za 1·1 m/sek brži od drugoga. Kolika je brzina čovjeka, koji hoda na bržem hodniku brzinom 1 m/sek u jednom ili drugom smjeru?

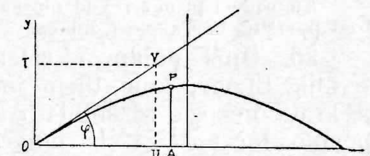
33. Vodoravni hitac. Bacimo tijelo iz točke O (sl. 27.) u vodoravnom smjeru Ox. Kad ne bi Zemlja privlačila tijelo, ono bi se gibalo jednoliko u pravcu Ox. Ako bi u 0·1 sek bio prevaljen put OA, onda bi bili u 0·2, 0·3, 0·4, . . . sek putovi $OB = 2 \cdot OA$, $OC = 3 \cdot OA$, $OD = 4 \cdot OA$ . . . U drugu ruku, da smo tijelo mirno pustili iz ruke, tijelo bi prosto padalo, te bi prevalilo u 0·1 sek put OI (= 5 cm), u 0·2, 0·3, 0·4 . . . sek putove $OJ = 4 \cdot OI$, $OK = 9\ OI$, $OL = 16 \cdot OI$. . . Gibanje bačenoga tijela dobiva se, ako putove u jednolikom gibanju i prostom padu, što ih ovdje zamislismo, sastavimo po zakonu paralelograma. Točke staze tijela O, P, Q, R, S. . . . ispunjaju krivulju parabolu. (Galilei poč. 17. vijeka.).



Sl. 27.

U željezničkim kolima, koja se giblju jednoliko na ravnoj pruzi, pustimo kamen iz ruke. Kamen u prvi mah ima brzinu u vodoravnom smjeru, naime brzinu željeznice, te se giblje u paraboli. No čovjeku u kolima pričinja se kao da kamen pada u vertikalnom pravcu. Otuda slijedi, u skladu sa crtnjom, da vodoravna komponenta brzine ostaje jednaka brzini željeznice, te je stalna. — Iz crtnje slijedi, da tijelo stigne u kojugod točku S u onolikom vremenu, koliko bi trebalo da vertikalno padajući dođe do jednako duboke točke L. Doista ako u isti čas jedno tijelo bacimo vodoravno, a drugo iz iste visine pustimo prosto padati, čut ćemo, kako oba tijela istodobno udare o tle. Pokus se načini tako, da se jedno tijelo metne u kut stola i ravnalom udari u vodoravnom smjeru; na kraju ravnala nalazilo se drugo tijelo, koje radi pomaka ravnala izgubi svoj podlog, te počne padati. — Put tijela kod hica pokazuje se mlazom vode.

34. Kosi hitac. Ako se tijelo baci koso u vis brzinom na pr. 11 m/sek, u smjeru, koji s vodoravnom brzinom čini neki priklon ili „kut elevacije" φ (lat. *elevo, dižem*) (sl. 28.) na pr. 34°, vrijedi onakva crtnja kao i kod vodoravnoga hica. Da bude račun zgodniji, rastavlja se početna brzina OV u horizontalnu komponentu $OU = 11\ cos\ 34^0$ i u vertikalnu komponentu $OT = 11\ sin\ 34^0$. Tijelo se giblje u vodoravnom smjeru jednoliko, te je vodoravna komponenta puta iza t sek



Sl. 28.

$$OA = x = 11\ cos\ 34^0 \cdot t \text{ met.}$$

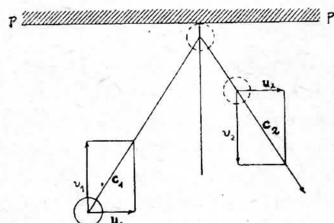
U visinu se giblje jednoliko, a uz to suprotnim smjerom prosto pada, tako da je vertikalna komponenta puta

$$AP = y = 11\ sin\ 34^0 \cdot t - \frac{9{\cdot}81}{2} \cdot t^2 \text{ met.}$$

Ako je kut elevacije = 0, bit će hitac vodoravan; ako je taj kut = 90^0, hitac je vertikalan. Formula vertikalnoga hica, kako izlazi po tom razlaganju, podudara se sa zakonom prostoga pada (isp. § 23.), ako početak brojenja puta i početak vremena premjestimo u najvišu točku.

Krivùlja je kosoga hica parabola, koja je simetrična prema vertikalnom pravcu, što ide kroz najvišu točku krivulje. — Kod velikih brzina otpor uzduha znatno utječe, te put nije ni približno parabola. Kod topa, koji baca tane preko 100 km daleko, pogoduje daljini hica, što tane velikim dijelom puta leti kroz visoke slojeve uzduha, gdje je otpor malen. — „Bumerang“, oružje Australaca, leti uzduhom zamršenim krivuljama, pa se i povrati k onome, koji ga je bacio.

35. Zakon odbijanja. Ako elastična kugla udari u mirnu, glatku elastičnu ploču koso, odbit će se po ovim zakonima: 1.) brzina je kugle poslije sraza veličinom jednaka brzini prije sraza; 2.) put kuglinoga središta leži u ravnini okomitoj na ravnini ploče, u t. zv. r a v n i n i r e f l e k s i j e (lat. *reflecto, obraćam*); 3.) k u t j e o d r a z a j e d n a k k u t u d o r a z a; kut doraza ili incidencije (lat. *incido, padam na nešto*) jest kut, što ga čine smjer gibanja prije sraza i pravac okomit na ravninu ploče; kut je odraza ili refleksije kut tog pravca sa smjerom gibanja poslije sraza.

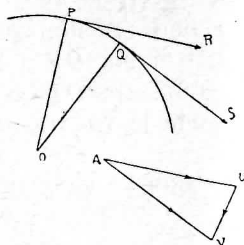


Sl. 29.

Dokaz. Brzinu c_1 prije sraza rastavimo u komponentu u_1 usporednu sa pločom PP (sl. 29.) i komponentu v_1 okomitu na ploči; tako isto neka ima brzina poslije sraza c_2 komponente u_2 i v_2. Radi glatkoće smjer je sile, kojom ploča djeluje na kuglu, okomit na ploču. Zato se srazom mijenja samo okomita komponenta brzine. Da nema komponente u_1, kugla bi se odrazila brzinom $v_2 = - v_1$. Ta komponenta v_2 zajedno sa u_2 ($= u_1$) daju za rezultantu brzinu c_2 poslije sraza. Razabiremo, da su paralelogrami brzina poslije sraza i prije sraza sukladni, pa su time i zakoni sraza objašnjeni.

Amo ide i primjer, kad plosnat kamen bacimo pod velikim kutom doraza na vodu, te od površine odskakuje („žabica“).

36. Opći pojam akceleracije. Tijelo neka se giblje u kakvojgod krivulji. Brzine, koje tijelo imade u točkama P i Q, t. j. na početku i na kraju nekoga razdoblja Δt, predočimo dužinama AU i AV (sl. 30.); spojimo točke U i V pravcem. Kad bi tijelo imalo u i s t i m a h brzine AU i UV, bila bi njegova rezultantna brzina AV, kako izlazi iz paralelograma (trokuta) brzina. Uistinu tijelo ima brzinu AV k a s n i j e negoli brzinu AU, pa možemo pomišljati, da je brzina AV nastala iz brzine AU na taj način, da joj se brzina UV dodala. U tom je smislu UV porast brzine. Omjer toga porasta i porasta vremena, t. j. UV: Δt, zove se kao i u specijalnijem primjeru u § 24. s r e d n j a a k c e l e r a c i j a, a kažemo, da srednja akceleracija ima smjer porasta brzine UV. Ako je vrijeme Δt vrlo sitno, srednja se akceleracija zove naprosto a k c e l e r a c i j a. To je



Sl. 30.

o p ć i pojam akceleracije; on je znatan zato, jer za nj (prema Newtonovoj nauci) vrijedi ista ona osnovna jednadžba dinamike, koja valja za silu p, masu m i akceleraciju a pravocrnoga gibanja: $p = ma$; treba ovdje dodati, da a k c e l e r a c i j a i m a i s t i s m j e r k a o i s i l a.

37. Centripetalna sila. Ako se tijelo giblje jednoliko u periferiji kruga, djeluje na nj — kako će se niže objasniti — sila stalne veličine, koja ga neprestance vuče prema središtu. Ta se sila zove c e n t r i p e t a l n a (lat. *peto, težim na što*). Ako utez privezan na užetu vitlamo oko ruke, kojom držimo drugi kraj užeta, centripetalna sila dolazi od napetosti užeta, te uže vuče utez. (Doduše u tom primjeru radi djelovanja težine uteza gibanje nije jednoliko.) — Ako se čaša jednoliko vrti oko svoje geometrijske osi, a u čašu bacimo kakvo tijelo, ovo će naskoro pratiti gibanje čaše pritisnuvši se uza stijenu. Centripetalna je sila pritisak stijene na tijelo. — Zemlja se kreće oko Sunca približno u kružnici, kojoj je središte Sunce. Centripetalna je sila privlačna sila Sunca.

Neka je O središte kružnice (sl. 30.), P tijelo, OP radijvektor, v cm/sek brzina tijela. Ako radijvektor u 1 sek načini zakret ω radijana, velimo, da je k u t n a b r z i n a ω radijan/sek. U malenom vremenu Δt tijelo je prevalilo put PQ; tome pripada središnji kut $\omega \cdot \Delta t$; za jednak se kut zakrenuo smjer brzine, jer je brzina okomita na radijvektoru. Ako se brzina PR na početku vremena Δt i brzina QS na kraju toga vremena predoče sa zajedničkom početnom točkom A dakle $AU \# PR$ i $AV \# QS$, bit će kut $UAV = \omega \cdot \Delta t$, a porast brzine je sitna osnovka UV istokračnoga trokuta UAV, pa je možemo držati lukom, kojemu je središte A. Budući da je *luk = polumjer × središnji kut*, izlazi $UV = v \times \omega \, \Delta t$. Prema tome je akceleracija

$$a = \frac{UV}{\Delta t} = v \, \omega.$$

Kako je luk okomit na polumjeru, dakle UV okomito na brzini, vrijedi to i za akceleraciju, te akceleracija ima smjer polumjera. Isto dakle vrijedi i za silu, koja je uzrok akceleracije. Ako je m masa tijela, veličina je sile

$$p = m\,a = m\,v\,\omega$$

U zadaćama obično se upotrebljavaju nešto zamršenije formule za a i p. Ako je $r = OP$, bit će u 1 sek prevaljeni put $v = r \cdot \omega$. Uzme li se odavle ω i uvrsti u jednadžbe za a i p, dobiva se

$$a = \frac{v^2}{r}, \; p = \frac{m\,v^2}{r} \quad \text{(cm, sek, g, din).}$$

Ako je T vrijeme ophoda tijela, tako da tijelo brzinom v u vremenu T opiše periferiju $2\,r\,\pi$, po zakonu je jednolikoga gibanja $2\,r\,\pi = v\,T$. Odatle se potraži v i uvrsti u netom dobivene formule; time se dobiva (H u y g e n s[1])

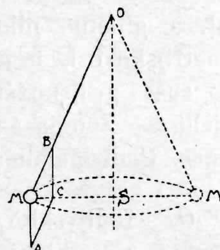
$$a = \frac{4\pi^2 r}{T^2} \qquad p = \frac{m \cdot 4\pi^2 r}{T^2}.$$

[1]) U djelu „Horologium oscillatorium" (= „Ura njihalica") 1673.

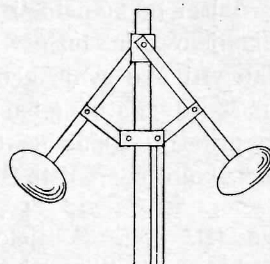
Zad. **29.** Utez 20 g vrtimo u kružnici polumjera 20 cm, te u 1 sek načini 4 okreta. Kolika je centripet. akceleracija? kolika centripet. sila? koliko je puta ona veća od težine utega?

Zad. **30.** Koliko bi moralo biti vrijeme okreta Zemlje, da točka na ekvatoru ima centripetalnu akceleraciju 9·8 m/sek²? (Najveći krug Zemlje ima približno dužinu 40 000 km.) U tom bi se slučaju činilo, kanda tjelesa na ekvatoru nemaju težine.

Zad **31.** Neka se pročita iz gornjih formula, kako zavisi centrip. sila o polumjeru 1.) kod čestica istoga kotača, 2.) kod čestica na rubovima dvaju kotača, koji jedan drugi remenom pokreću?



Sl. 31.



Sl. 32.

Ako tijelo M, koje visi na koncu MO, maknemo iz položaja ravnoteže, može mu se zgodnim udarcem dati takva brzina, da se giblje u kružnici MM, koja leži u horizontalnoj ravnini (sl. 31.). Konac pri tom opisuje stožac, te govorimo o k o n i č n o m njihalu (grč. κῶνος, *stožac*). Centripetalna je sila MC uperena prema središtu S kruga; ona je rezultanta težine MA i napetosti konca MB. — T. zv. W a t t o v upravljač (1784.) jest dvostruko konično njihalo (sl. 32.), a služi upravljanju brzine parostroja. Što je veća brzina vrtnje upravljača, to je veći razmak obaju njihala (dvije teške kugle!). Upravljač je u svezi s ventilom, koji pušta paru u parni valjak; ide li stroj prebrzo, njihala se razilaze i ventil se zatvara i t. d. — Kod kinematografskih sprava ima pločica, kojom se sprečava dolaženje svjetlosti na film, kad film miruje (inače bi se film odviše ugrijao, te bi planuo); kad se film pomiče, pločica je maleni m Wattovim upravljačem automatski uklonjena. — Kad kola idu putom, koji je u krug savinut, centripetalna je sila rezultanta težine kola i pritiska tla; taj pritisak treba dakle da je priklonjen prema vertikali. No glatka h o r i z o n t a l n a podloga ne bi mogla izvoditi takova pritiska. (Priklon željezničke pruge na zavoju, priklon koturaškog trkališta.)

38. Centrifugalna sila. Kad vitlam utez na užetu, napetost užeta vuče utez prema središtu t. j. prema ruci; u isti mah osjećam, da uže nateže ruku. Ta sila vuče smjerom od središta, pa se zove c e n t r i f u g a l n a (lat. *fugio, bježim od nečega*). Centrifugalna sila nastaje poradi ustrajnosti; utez nastoji odletjeti smjerom tangente kružnice, u kojoj se giblje; zato on napinje uže i tako izvodi centrifugalnu silu. Kako centripetalna i centrifugalna sila dolaze od napetosti užeta, one su veličinom jednake. — Kad se maleno tijelo u čaši vrti zajedno sa čašom pritisnuvši se uza stijenu njezinu, pritisak toga tijela na stijenu jest centrifugalna sila. — Centripetalnoj se sili međutim ne može u svakom primjeru uz bok staviti centrifugalna. Na pr. kod gibanja Zemlje oko Sunca nema centrifugalne sile.

H u y g e n s stojeći na „relativističkom" stajalištu (v. kasnije) drukčije je zamišljao centrifugalnu silu. Baš za nju našao je formule prednšnjega §; N e w t o n je te formule prenio na centripetalnu silu.

Za pokuse o centripetalnoj i centrifugalnoj sili služi t. zv. c e n t r i f u g a l n i s t r o j (F e r g u s o n 1749.). Njime se tjelesa zgodno stavljaju u vrtnju bilo snagom ruke bilo kakim motorom. — U valjkovitoj posudi, koja se vrti oko osi valjka, površina tekućine ima lijep udubljen oblik (paraboloid, H u y g e n s). Udubljenost površine može služiti, da se mjeri b r z i n a vrtnje; t a h o m e t a r s t e k u ć i n o m (grč. ταχύς, *brz*). — Kugla od ilovače vrtnjom se splošti, što podsjeća na splоštenost Zemlje.

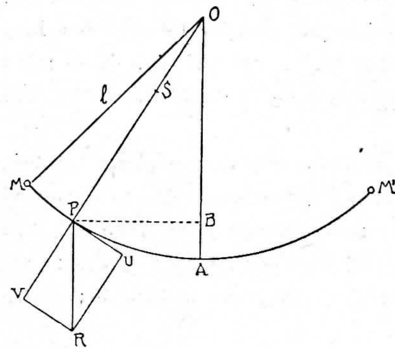
Ako su centrifugalne sile prevelike, mehanizam se rastrgne (na pr. eksplozija kotača!). U taj čas prestanu djelovati centripetalne sile i dijelovi se mehanizma počnu udaljivati od središta. To je „centrifugalno gibanje" u skladu sa zakonom ustrajnosti i ne valja ga pripisati nikojoj sili. Mnoge su praktične primjene centrifugalnog gibanja: sprava za sušenje; c e n t r i f u g a, sprava za brzo odlučivanje čestica, što lebde u tekućini; centrifugalna sisaljka i t. d.

Kao što je za težinu tijela mg osim mase m važna i akceleracija teže g, tako je za centrifugalnu silu, jer je jednaka (i protivna) centripetalnoj ma, važna centripetalna akceleracija a. Da jasnije ocijenimo centrifugalnu silu, možemo a isporediti sa g. Tako su kod u l t r a c e n t r i f u g e (do 1000 i više okreta u sekundi!) dostignute vrijednosti $a = 1\,000\,000\ g$, drugim riječima u takvoj spravi masa 1 gram pritiskuje stijenu silom, koja je 1 000 000 puta veća od njegove težine, t. j. silom 1 tone. Ako u aeroplanu na zavoju staze centripetalna akceleracija dosegne vrijednost od kojih 6 g, čovjeka hvata sljepoća (prolazna); kod kojih 8 g nastupa nesvijest.

39. Gibanje u kojojgod krivulji. Savinuta žica neka se sva nalazi u horizontalnoj ravnini; na žicu se navede probušeno tijelo. Kad bi se ono moglo na žici pomicati bez trenja, brzina bi tijela bila stalna. Na tijelo naime djeluju tlak žice i težina tijela, a obje su ove sile okomite na smjer žice, te ne mogu tijelu podati akceleracije u smjeru žice. — Ako se tijelo giblje u krivulji, koja nije horizontalna, može se put tijela rastaviti u malene komadiće pravca. Na svakom tom komadiću puta brzina naraste toliko kao da se tijelo jednako duboko spustilo u prostom padu (isp. § 22.). Budući da se brzina poradi samoga savijanja puta ne mijenja, izlazi, da je ukupni prirast brzine kod padanja na krivulji jednak prirastu, koji bi nastao kod prostog padanja. P a d a j u l i t j e l e s a i z i s t e t o č k e r a z n i m k r i v u l j a m a, u j e d n a k i m ć e v i s i n a m a i m a t i j e d n a k e b r z i n e. (To vrijedi i onda, ako tijelo mjestimice ide uzbrdo.)

40. Jednostavno njihalo. Maleno teško tijelo M mase m g neka visi na lakom koncu ili štapu MO dužine l cm, kojemu je drugi kraj O učvršćen. Ta se sprava zove j e d n o s t a v n o n j i h a l o, a može izvoditi raznovrsna gibanja (kako se giblje kao konično njihalo, opisano je u § 37.). Ispitat ćemo gibanje, koje nastaje, kad se njihalo namjesti koso, u položaj MO (sl. 33.) i mirno prepusti samom sebi. Tijelo će M njihati u kružnom luku

MAM', koji leži u vertikalnoj ravnini položenoj kroz „objesište" *O*. Prema predašnjem § bit će brzina točke *M* u jednakim visinama jednaka; dakle će ona smjer svoga gibanja okrenuti (t. j. imati brzinu 0) u jednako visokim točkama *M* i *M'*. (To doduše — zbog otpora uzduha i trenja u objesištu — vrijedi samo približno, te krajnje točke luka njihanja postaju sve niže.)



Sl. 33.

U kojojgod točki *P*, u koju stigne tijelo *M*, djeluju na nj: 1.) težina $PR = 981\ m$ din, 2.) napetost konca *PS* din; prvu silu rastavimo u komponentu *PU*, koja ima smjer tangente, i komponentu *PV* u smjeru konca. Budući da se tijelo giblje u luku, treba da na nj djeluje centripetalna sila, a to je upravo sila $PS - PV$; ona mijenja smjer gibanja. Sila *PU* mijenja veličinu brzine. Kad tijelo dođe u položaj ravnoteže *A*, sila je $PU = 0$; brzina se dakle ovdje ne mijenja nego tijelo s dobivenom brzinom prelazi iz padanja u dizanje.

Kad je kut *AOM*, koji se zove zamah njihanja, malen, teorija je njihala jednostavna. Neka je *PB* okomica spuštena iz točke *P* na pravac *OA*. Onda je zbog sličnosti trokuta

$$PU : PR = PB : PO.$$

Kako je $PB \doteq PA$, može se ovaj razmjer pisati

$$PU : 981\ m = PA : l.$$

Odatle slijedi

$$PU = \frac{981\,m}{l} \cdot PA.$$

Sila je *PU* dakle približno razmjerna luku *PA*. Prema tome (isp. § 26) je njihanje jednostavno titranje, te vrijedi formula

$$PU = \frac{4\pi^2 m}{T^2} \cdot PA,$$

gdje je *T* vrijeme 1 titraja. Ispoređivanjem obadviju formula izlazi $\frac{981\,m}{l} = \frac{4\pi^2 m}{T^2}$, dakle je $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{981}}$. Gibanje od *M* do *M'* zove se 1 njihaj, dakle je vrijeme 1 njihaja

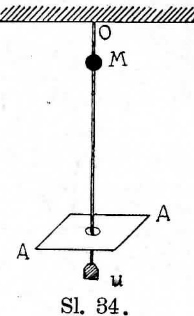
$$t = \frac{T}{2} = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

(Huygens 1673.).

1.) Dobivena formula daje jednako *t*, bio zamah malen ili nešto veći; vrijeme njihaja ne zavisi o zamahu (Galilei, pod kraj 16. vijeka). Točnija teorija (Euler 1777.) pokazuje, da je na pr. kod zamaha $AOM = 20^0$ vrijeme $t = 1{\cdot}0076 \cdot \pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, što se od izraza, koji vrijedi kod malenih zamaha, ne razlikuje ni za 1%. Uzme li se zamah gotovo 180°, vrijeme je njihanja vrlo veliko (u tom slučaju treba uzeti njihalo sa štapom, a ne sa koncem, jer bi se inače razmak tijela od objesišta smanjio).

2.) U formuli za *t* nema mase *m*, dakle laka i teška njihala imadu jednako vrijeme njihaja; pokusi, koji to potvrđuju, dokazuju posredno, da je akceleracija prostoga pada *g* za sva tjelesa jednaka i da se troma masa ne razlikuje od teške mase (§ 17.).

3.) Vrijeme njihaja razmjerno je s korijenom dužine njihala; ono je za njihalo 4-struke dužine 2-struko, za njihalo 9-struke dužine 3-struko (Galilei 1638.).



Sl. 34.

4.) Vrijeme je njihaja obrnuto razmjerno s korijenom akceleracije teže. Krupno se to može pokazati ovako. Na strop se objesi kratko njihalo *MO* (sl. 34.) i na tijelo *M* na dugačkom koncu *MU* utez *U*; donji dio konca *MU* ide kroz otvor u čvrstoj ploči *AA*, tako da se utez *U* ne može njihati. Težina uteza *U* vuče njihalo *M* vazda otprilike vertikalnim smjerom. Ako utez *U* ne visi na tijelu *M*, tijelo se njiše samo pod utjecajem svoje težine; doda li se utez *U*, djeluje na tijelo *M* još i težina uteza *U*, pa je akceleracija *g* veća, dakle vrijeme njihaja manje.

Njihalo, koje svake sekunde načini 1 njihaj, zove se sekundno njihalo. — Ako njihalo maknemo iz položaja ravnoteže i onda pustimo udarivši ga slabo na stranu, gibat će se u zamršenoj krivulji; dijelovi krivulje donekle naliče elipsama, pa kažemo, da njihalo izvodi eliptičke njihaje. U slici 35. prikazan je put točke *M* u horizontalnoj projekciji.


Sl. 35.

Zad. **32.** Na nekom mjestu Zemlje sekundno njihalo ima dužinu 99·4 cm; koliko je *g*? [981·0 sek]

Zad. **33.** Ako je $g = 9{\cdot}8$ m/sek², koliko je vrijeme njihaja za njihalo dugo 100 m? [10·03 sek]

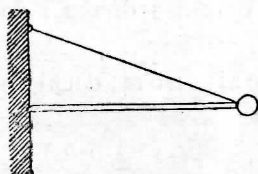
Zad. **34.** Svjetiljka u crkvi načini 100 njihaja u 6 min 40 sek; kolika je od prilike dužina žice, na kojoj svjetiljka visi? [15·9 m]

Zad. **35.** Njihalo s masom 10 g njiše se sa zamahom 90°; kolika je napetost konca u položaju ravnoteže?

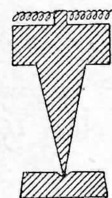
[Formula za brzinu *v* daje $v^2 = 2\,g\,l$, centripetalna je sila $\frac{mv^2}{l}$ i t. d. — Rezultat $3 \cdot 10 \cdot 981$ din = 30 g*]

Zad. 36. U cirkusu se biciklist proveze vertikalnom kružnom zamkom, kojoj je polumjer 4 m; koju vrijednost treba da brzina biciklistova u najvišoj točki zamke premaši, da se vozač ne strmoglavi? [6·3 m/sek]

41. Osobite vrsti njihala. Da se odredi brzina taneta, može se upotrebiti balistično njihalo (Robins 1742.; balistika, nauka o gibanju taneta; lat. *balista, stroj za bacanje*). Sanduk ispunjen glinom velike mase visi kao njihalo; u sanduk udari tane, pa nastane sraz neelastičnih tjelesa; kad bi bila poznata brzina taneta, mogla bi se iz masa sanduka i taneta izračunati brzina poslije sraza, a onda i visina, do koje će se sanduk iza sraza zanjihati. Obrnuto može se iz te visine odrediti brzina taneta.


Sl. 36.

Ako su stožeri od vrata u istom vertikalnom pravcu, vrata mogu mirovati u svakom namještaju. Ako to nije, vrata imadu sasvim određenu ravnotežu. Iz te ravnoteže vrata se mogu vrlo malenom silom znatno pomaći. Nešto je slično kod t. zv. horizontalnoga njihala (Hengler 1830.), kojega se uredba razabira iz sl. 36. Ono može služiti ne samo da opažamo djelovanje vrlo slabih sila, nego još i tome, da vidimo, je li se stijena, koja nosi njihalo, priklonila. Malena promjena priklona stijene može vrlo znatno promijeniti namještaj njihala.


Sl. 37.

Izvrnuto njihalo (sl. 37.) služi za bilježenje potresa t. j. kao seizmograf (grč. σεισμός, *potres*). Velika željezna masa stoji rek bi na jednoj točki; da se ne prevrne, drže je još elastična pera. Zanjiše li se ovo njihalo, bit će akceleracije njegova gibanja malene, jer je masa velika; zato će i vrijeme biti vrlo veliko. Potrese li se tlo, masa njihala zbog ustrajnosti ne će pratiti te trešnje, pa će mehanizam za bilježenje, koji je s njihalom čvrsto spojen, na papiru, koji se miče zajedno sa tlom, nacrtati t. zv. seizmogram ili sliku potresa. (Taj seizmograf pokazuje samo horizontalnu komponentu zemljine trešnje.)

d) Mehanika nebeska

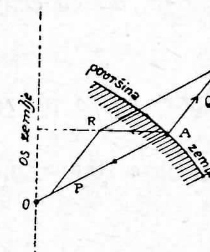
42. Vrti li se Zemlja? Do sada se nismo obazirali na to, koliko utječe na mehaničke pojave gibanje Zemlje, što ga nauča astronomija. Sad ćemo opisati pojave, koji se mogu prema nauci Newtonove mehanike samo onda razumjeti, ako uzmemo, da se Zemlja vrti oko svoje osi.

1.) Teža na različitim mjestima Zemlje. Našlo se, da isto njihalo sporije njiše, ako ga prenesemo bliže ekvatoru (Richer 1672.). Ta se činjenica odmah protumačila dnevnom vrtnjom Zemlje (Huygens).

Točke ekvatora zemaljskoga imadu centripetalnu akceleraciju, koja se izračunava po formuli $\frac{4\,\pi^2\,r}{T^2}$, gdje je r polumjer Zemlje ($2r\pi = 4 \cdot 10^9$ cm,

a T = 86164 sek, vrijeme okreta Zemlje (§ 3). Izlazi za spomenutu akceleraciju 3·4 cm/sek². Pusti li se tijelo da na ekvatoru prosto pada, tlo pred tijelom uzmiče akceleracijom 3·4. Prividna akceleracija padanja jest razlika prave akceleracije i akceleracije tla. Budući da je prividna akceleracija prostoga pada na ekvatoru 978·0, bit će dakle prava akceleracija 978·0 + 3·4 = 981·4. Na polovima nema vrtnje, pa se prividna i prava akceleracija teže podudaraju, te iznose 983·2 cm/sek².

Kad bi Zemlja bila homogena kugla, bila bi prava akceleracija teže na svim mjestima površine jednaka. Što se prava akceleracija teže na polu i ekvatoru ne podudaraju, dolazi otuda, što Zemlja nije kugla. Pokazat ćemo, da zbog vrtnje i ne može biti kugla. Tijelo A (sl. 38.) neka leži na površini Zemlje, koja neka je sasvim glatka. Na tijelo djeluje centripetalna sila AR smjerom okomitim na os zemaljsku. Ta je sila rezultanta težine tijela AP i tlaka AQ, kojim zemaljska površina na tijelo pritiskuje. Kako je glatka površina okomita na tlaku, što ga izvodi, ta površina nije okomita na smjeru sile teže. Čestice vode lako se jedna uz drugu pomiču, pa ako more miruje, površina morska mora imati oblik kakav bi imala glatka površina, na kojoj mogu tjelesa mirovati. I samo tlo zemaljsko, kako nije savršeno kruto, mora se tome obliku prilagoditi. Oblik je Zemlje približno rotacioni elipsoid, no pokazalo se teoretski, da bi nebeska tjelesa, koja se vrte, mogla imati i drugih oblika.



Sl. 38.

2.) Padanje s tornja. Vrh visoka tornja ima u vrtnji zemaljskoj veću brzinu negoli podnožje. Pustimo li na ekvatoru s tornja iz točke A tijelo da prosto pada, ono će u prvi mah imati horizontalnu komponentu brzine toliku kao i točka A tornja, pa kako je brzina podnožja manja, tijelo će preteći podnožje, te će pasti nešto istočnije od točke, u kojoj vertikala spuštena iz A zgađa tlo. (Na polovima zemaljskima ne očekujemo takav pojav.) Pomak na istok vrlo je neznatan, te se može samo uz veliku pažnju pokusima pokazati.

3.) Foncaultov pokus. Ako se dugačko njihalo s osobitim oprezom, bez udarca na stranu, pusti da njiše, ravnina će se njihanja na oko kretati. Razlog je tome vrtnja zemaljska. Kad bi se pokus izvodio na polu, ravnina bi njihanja u 1 danu zaostala za vrtnjom tla približno za 1 okret, jer Zemlja u jednom danu načini približno 1 okret; ona bi se dakle u 1 satu prividno zaokrenula za približno 360° : 24 = 15° i to u smjeru, koji je obrnut smjeru vrtnje zemaljske, dakle u smjeru dnevne vrtnje nebeskoga svoda. Na sjevernom se dakle polu ravnina njihanja zakreće smjerom, kojim se vrte kazala ure, na južnom polu obrnutim smjerom. — Na ekvatoru nema toga pojava,

a za kojugod geogr. širinu φ vrijedi približno zakon, da je zakret u 1 satu $= 15^0 \sin\varphi$. — Foucault izveo je opisani pokus u Parizu (1851.) s njihalom dugim 67 m, a teškim 28 kg.

43. Zakon opće gravitacije. Neke valjane pomisli o mehanizmu nebeskih pojava nalazimo već u staro doba, te na pr. Anaksagora ispoređuje gibanje Mjeseca oko Zemlje sa vitlanjem privezanoga kamena oko ruke. No sustavnu „mehaniku nebesku" osnovao je tek slavni Newton (1643.—1727[1].).

Da spoznamo osnove nebeske mehanike, ispitajmo bar krupno mehanizam gibanja planeta. Planeti giblju se oko Sunca približno u kružnicama. Ako je m g masa planeta, a cm polumjer njegove staze, T sek vrijeme ophoda, bit će centripetalna sila, kojom Sunce vuče planet, jednaka (§ 37.)

$$\frac{4\pi^2 m a}{T^2} \text{ din.}$$

Budući da za planete vrijedi III. Keplerov zakon

$$T^2 = c a^3,$$

gdje je c stalno, može se formula za centripetalnu silu bilježiti također

$$\frac{4\pi^2 m a}{c a^3} \text{ ili kraće } k \cdot \frac{m}{a^2}.$$

Sunce dakle vuče planete silama, koje su razmjerne masama planeta, a obrnuto razmjerne kvadratima njihovih razmaka od Sunca. Drugima riječima: kad bi se mogla podvostručiti masa planeta, podvostručila bi se sila, kojom ga Sunce vuče; a kad bismo mogli planet maći u dvostruku daljinu od Sunca, privlačna bi sila spala na $^1/_4$ vrijednosti.

Dobiveni izraz za silu još nam ne kaže, kako bi se privlačna sila Sunca promijenila, kad bi masa njegova narasla. Zacijelo je ta sila razmjerna i s masom Sunčanom M g, pa je možemo izraziti formulom

$$K \cdot \frac{M\,m}{a^2}.$$

Po zakonu protusile (§ 18.) i planet djeluje na Sunce, i to silom, koja je jednaka i protivna sili, kojom Sunce djeluje na planet. Gornji izraz predočuje dakle obje sile. Zamislimo li, da su M i m mase kojihgod dvaju nebeskih tijela, a njihov razmak, i opet gornji izraz daje njihovu privlačivost te predočuje zakon opće gravitacije (Newton 1682.; lat. *gravitas, težina*). Taj zakon kaže, da se dva tijela privlače protivnim, jednakim silama, koje su razmjerne masama tjelesa, a obrnuto razmjerne kvadratu njihova razmaka.

Faktor K zove se konstanta gravitacije. Kako je taj faktor kod svih primjena Newtonova zakona isti, ide on među t. zv. „univerzalne" konstante.

[1]) Djelom „Philosophiae naturalis principia mathematica" (= „Matematički osnovi prirodne filozofije") 1687. osnovao je teoretičku mehaniku.

Otuda što se planet giblje samo približno u krugu, ne slijedi, da je Newtonov zakon, koji smo iz te pretpostave izveli, samo približno valjan. Newton je pokazao, da taj zakon izlazi i točnijim izvodom.

Nebeska su tjelesa, kojima vidimo oblik, približno kugle. Kako treba primijeniti zakon gravitacije kod kugala? Svaka čestica jedne kugle privlači svaku česticu druge, pa je pitanje, koja je rezultanta svih tih sila. Newton je našao (1685.), da kugla sastavljena od koncentričnih homogenih ljusaka privlači izvanju tvarnu točku tolikom silom, kanda je sva masa kugle združena u središtu.

44. Potvrda zakona gravitacije. Sila, kojom Zemlja vuče tjelesa na svojoj površini, jest iste vrsti kao i sila, kojom Zemlja vuče Mjesec. Newton je to pokazao ovakovim računom. Neka je

masa Zemlje	M grama
masa Mjeseca	m „
masa kamena na površini zemaljskoj	μ „
udaljenost Mjeseca od Zemlje	$R = 3{\cdot}844 \times 10^{10}$ cm
polumjer Zemlje	$r = 6{\cdot}367 \times 10^8$ cm
vrijeme ophoda mjesečeva	$T = 2{\cdot}3606 \times 10^6$ sek
težina kamena	$\mu\, g$ din.

$$\mu\, g = K\,\frac{M\mu}{r^2} \quad \text{ili} \quad g = K\,\frac{M}{r^2}.$$

Ako se sila, kojom Zemlja vuče Mjesec, izrazi jedamput zakonom centripetalne sile, drugi puta zakonom gravitacije, dobiva se

$$\frac{4\pi^2 m R}{T^2} = K\,\frac{M m}{R^2} \quad \text{ili} \quad \frac{4\pi^2 R}{T^2} = K\,\frac{M}{R^2}.$$

Ako se iz 2. i 4. jednadžbe eliminira nepoznati umnožak KM, slijedi

$$g = 4\,\pi^2 \cdot \frac{R^3}{T^2 r^2} = 993 \text{ cm/sek}^2,$$

pa je tako akceleracija prostoga pada određena iz pukih astronomskih podataka. (Pogreška u rezultatu $= 1\%$, isp. § 46.)

Zad. 37. Za koliko postaje utez 1 kilogram lagljí, ako ga dignemo 10 m iznad površine zemaljske, a polumjer je zemlje 6367 km? [za 3 mg*]

Zad. 38. Koliko je puta akceleracija prostoga pada na površini sunčanoj veća od 982 cm/sek², ako je polumjer Sunca 695 500 km, udaljenost Zemlje od Sunca 148 500 000 km, vrijeme ophoda Zemlje 365·25 × 86400 sek?

45. Mase nebeskih tjelesa. Primjenom Newtonova zakona mogu se ispoređivati mase zvijezda. Isporedit ćemo na pr. masu Sunca M s masom Zemlje m. Kao u pređašnjem § imamo

$$K\,\frac{m}{r^2} = g = 9{\cdot}82 \text{ m/sek}^2,$$

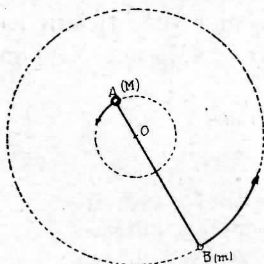
gdje je polumjer Zemlje $r = 6{\cdot}367 \times 10^6$ m. Ako je razmak Zemlje i Sunca $R = 1{\cdot}495 \times 10^{11}$ m, a vrijeme je ophoda Zemlje $T = 365{\cdot}25 \times 86400$ sek, izlazi kao u pređ. §,

$$\frac{4\pi^2 m R}{T^2} = K\,\frac{M m}{R^2} \quad \text{ili} \quad K\,\frac{M}{R^2} = \frac{4\pi^2 R}{T^2}.$$

Ako se podijeli 3. jednadžba sa 1. i poznate veličine prenesu na desno, dobiva se

$$\frac{M}{m} = \frac{4\pi^2 R^3}{r^2 T^2 g} = 333\,000.$$

Masa je Sunca 333 000 puta veća od mase zemaljske. (Ne bi bilo zgodno reći, da je Sunce 333 000 puta „teže" od Zemlje, jer se jedva može zamisliti vaga, na kojoj bi se te težine ispoređivale, i nebesko tijelo, na kojem bi ta vaga stajala.) Od mase najvećega planeta, Jupitera, sunčana je masa samo 1295 puta veća.



Sl. 39.

46. Mehanizam dvojnih zvijezda. Budući da je masa Sunca mnogo veća od masa planeta, podjeljuju planeti Suncu akceleracije, koje su razmjerno neznatne. Zato smo bez znatne pogreške mogli pomišljati, da je Sunce mirno središte, oko kojega kruže planeti. Kod dvojnih zvijezda razlika masa nije tako velika, pa treba pripaziti na gibanje jedne i druge zvijezde. U najjednostavnijim primjerima one se giblju u dva koncentrična kruga, tako da spojnica AB obiju zvijezda ide vazda kroz središte O (sl. 39.), pa je vrijeme ophoda T za obje zvijezde jednako. Neka je OA polumjer staze zvijezde A, kojoj je masa M, a OB polumjer staze druge zvijezde B, kojoj je masa m. Kako su centripetalne sile, kojima djeluju zvijezde jedna na drugu, jednake, vrijedi jednadžba

$$\frac{4\pi^2 M \times OA}{T^2} = \frac{4\pi^2 m \times OB}{T^2} \text{ ili } M \times OA = m \times OB \text{ ili } \frac{OA}{OB} = \frac{m}{M}.$$

Polumjeri su staza dakle obrnuto razmjerni masama. Kad se položaj neke točke O na spojnici AB dviju masa određuje prema tome razmjeru, točka se O zove težište obiju masa. Dvojne se zvijezde giblju dakle oko zajedničkoga težišta. Poznavajući staze dvojnih zvijezda možemo za te zvijezde izračunati i mase, te na pr. izlazi za Sirij, da mu je masa = 2·4 mase sunčane, dok je masa njegova „Pratioca" = $^3/_4$ mase sunčane. Taj je pratilac Sirijev slaba sjaja, te je dalekozorom otkriven kasnije negoli što je Bessel upozorio (1844.), da se Sirij pomiče tako, kaoda na nj utječe neko susjedno nebesko tijelo.

Masa je Zemlje samo 81 puta veća od mase mjesečeve, pa je dosta pogrešno, ako se uzme, da se Mjesec giblje oko središta zemaljskoga. On se giblje oko težišta sustava, što ga čini Zemlja sa Mjesecom. (Oko toga težišta obilazi i središte zemaljsko.) Ako se račun veličine g u § 44. prema tome popravi, izlazi i bolji rezultat.

47. Perturbacije. Kad bi na planet djelovalo samo Sunce, planet bi se gibao točno u skladu s I. i II. Keplerovim zakonom. No planet privlače još i svi ostali planeti. Budući da su mase planetâ malene prema masi sunčanoj, potonje sile nisu velike prema sili Sunca, ali ipak nisu ni tako sitne, da se njihov utjecaj na oblik staze planeta kod točnijih motrenja ne bi opazio. Staze planeta nisu dakle u potpunom skladu s Keplerovim zakonima, već jedan planet drugome omeće stazu izvodeći perturbacije ili smetnje (lat. *perturbo, omećem*). — Osobito znatne perturbacije nastaju kod repatica, kad se one približe kojemu velikome planetu; staza se repatice može perturbacijama sasvim promijeniti. Prvi je znatni uspjeh računa perturbacija bio, kad je Halleyeva repatica prošla kroz perihel g. 1759. u doba, koje se računom proreklo (Clairaut). Leverrier je razliku između opažane i izračunane staze Uranove objasnio perturbacijama, koje izvodi neki nepoznati planet, pa je odredio i stazu toga planeta; doista iza kratkoga vremena nađoše taj planet blizu izračunanoga mjesta (otkriće Neptuna 1846.).

Potanji razvoj mehanike nebeske, koju je iza Newtona najviše unapredio Laplace[1]), pokazao je, da primjena Newtonova zakona vodi do rezultata, koji se osobito točno podudaraju s iskustvom. Sitan nesklad nalazimo kod staze Merkurove; njezin se perihel pomiče ponešto brže nego što izlazi iz računa perturbacija. Dolazi to otuda, što možda nisu poznata sva nebeska tjelesa, koja pri tom utječu, ili otuda, što možda Newtonov zakon vrijedi samo približno, ili najposlije otuda, što osnovi mehanike, kako je ovdje učimo (t. zv. klasična ili Newtonova mehanika!), ne vrijede sasvim točno.

48. Masa zemaljska. Konstanta gravitacije K može se odrediti pokusima. Izmjeri se sila p dina, kojom se privlače dvije teške kugle poznatih masa M i m g, ako je razmak njihovih središta a cm. Uvrstivši sve ove veličine u formulu Newtonova zakona $p = K \frac{Mm}{a^2}$ možemo onda K izračunati. Ta mjerenja (Cavendish 1798.) nisu jednostavna, jer tjelesa, s kojima eksperimentiramo, ne mogu biti velika, pa je njihova međusobna gravitacija neznatna. (Zato ni ne opažamo gravitacije, kojom tjelesa oko nas jedno drugo privlače.) Rezultat je mjerenja, da je $K = 6{\cdot}7 \times 10^{-8}$, te Newtonov zakon glasi

$$p = 6{\cdot}7 \times 10^{-8} \times \frac{Mm}{a^2} \text{ (din, gram, cm)},$$

Na pr. ako su središta dviju kugala udaljena za $a = 10$ cm, a mase su im jednake, i to $M = m = 1000$ g, kugle se privlače silom p = 0·00067 din (= 0·0000007 g*).

Zemlja privlači tijelo mase m g na svojoj površini silom 981 m din; ako je masa zemlje M g, a polumjer $6{\cdot}37 \times 10^8$ cm, ta je sila prema zakonu

[1]) u djelu „Mécanique céleste" (= „Mehanika nebeska) 1799.—1825.

gravitacije $6{\cdot}7 \times 10^{-8} \times \frac{M\ m}{(6{\cdot}37 \times 10^8)^2}$ din. Isporede li se oba izraza za silu, dobiva se jednadžba, iz koje slijedi masa Zemlje $M = 6 \times 10^{27}$ grama = 6 kvadriljuna kilograma. Odatle opet izlazi srednja gustoća Zemlje 5·5 g/cm³ (Gustoća je zemaljske površine poprijeko manja od te vrijednosti.)

Zad. 39. U Sunca je masa 333000 puta, promjer 109 puta veći negoli u Zemlje; kolika je (srednja) gustoća Sunca?

49. Djelovanje u daljinu. Zakon opće gravitacije zadaje fizici pitanje, koje je znatno i sa gledišta filozofije prirode: je li sila gravitacije nešto neposredno? zar Sunce vuče Zemlju, a da ništa tvarno ne spaja oba tijela? može li tijelo djelovati tamo, gdje se samo i ne nalazi? u kratko: ima li „djelovanja u daljinu" (lat. *actio in distans*)? Ima ih, koji drže da tjelesa djeluju jedno na drugo samo dotikom; prema tome mišljenju trebalo bi Newtonovu nauku upotpuniti i pokazati, koji sakriveni mehanizam uzrokuje gravitaciju. (Na pr. hipoteza Le Sageova 1782.).

Boškovićeva[1]) nauka o atomima (1748.), koju zovu „jednostavnom atomistikom", ne poznaje drugih sila već samo djelovanje u daljinu. Po njoj je tvar sastavljena od atoma, koji su prave tvarne točke dakle bez ikakvih protega. Do razmaka atoma stoji, hoće li se oni privlačiti ili odbijati. U najsitnijim se razmacima atomi odbijaju, jer bi se inače dva atoma mogla sjediniti.

e) Energija, relativnost

50. Radnja. Pojmovi dužina, vrijeme, brzina, akceleracija, masa i sila dostatan su osnov za rješavanje svih mehaničkih zadaća. Pojam se „mehanička radnja" uvodi u nauku, 1.) da se mehanički pojavi mogu dovesti u svezu s drugim fizikalnim pojavima, 2.) da se olakša rješavanje mehaničkih zadaća, 3.) radi primjena u tehnici. — Kada netko diže teret ili kad napinje elastično pero i t. d., kažemo, da vrši radnju. Kad teret dižemo 2 m visoko, kažemo da je radnja 2 puta veća negoli kad ga dižemo 1 m visoko; radnje jednakih sila razmjerne su putovima. Kad dignemo teret težak 10 kg*, kažemo, da smo izveli 2 puta veću radnju negoli kada jednako visoko dignemo teret težak 5 kg*; na jednakim putovima radnje su razmjerne silama. Ako je dakle na tijelo djelovala sila p, a tijelo se u smjeru sile pomaklo za dužinu s, može se radnja w bilježiti formulom $w = \alpha \cdot p\ s$. Redovno se jedinica radnje odabira tako, da je konstanta razmjernosti $\alpha = 1$. Onda je

$$w = p \cdot s.$$

[1]) Hrvat Ruđer Josip Bošković (Boscovich) rodio se u Dubrovniku 18. svibnja 1711., a umro je u Milanu 13. veljače 1787. Najpoznatije mu je djelo „Philosophiae naturalis theoria redacta ad unicam legem virium in natura existentium" (= „Teorija prirodne filozofije svedena na jedan zakon sila, što u prirodi postoje") 1758.

Radnja sile 1 kg* na putu 1 m zove se 1 kilogram*-metar i bilježi 1 kg*m. Manja je jedinica radnja, što je izvede sila 1 g* na putu 1 cm.

$$1\ \text{kg*m} = 1000 \times 100\ \text{g*cm} = 10^5\ \text{g*cm}.$$

To su jedinice tehničkoga sustava. Dinamička je jedinica radnje 1 erg (grč. ἔργον, *radnja*); to je radnja sile 1 din na putu 1 cm. Veća je od nje jedinica

$$1\ \text{džul} = 10^7\ \text{erg},$$

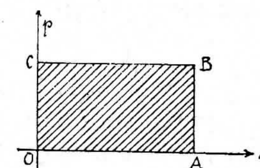
koja se mnogo upotrebljava u nauci o elektricitetu.

$$1\ \text{g*cm} = 981 \times 1\ \text{erg} = 981\ \text{erg}.$$

$$1\ \text{kg*m} = 10^5 \times 981 : 10^7\ \text{džul} = 9{\cdot}81\ \text{džul}.$$

Kad dižemo teret, gibanje je obično jednoliko, jer sila drži ravnotežu težini tereta. Kad bismo upotrebili silu jaču od težine tereta, teret bi se gibao ubrzano. Uostalom bez obzira na brzinu tijela umnožak sile i puta vazda zovemo radnjom.

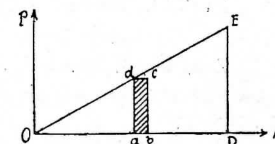
Ako se sila mijenja, treba odrediti radnju $p \cdot \Delta s$ za svaki maleni komadić puta Δs i tako dobivene radnje zbrojiti, te je $w = \Sigma\ (p \cdot \Delta s)$.



Sl. 40.

Ako teret spuštam na užetu, zadržavam ga silom, kojoj je smjer protivan smjeru gibanja. U takvim primjerima označujemo radnju negativnim predznakom. Kad uteg dižemo, zemlja vrši negativnu radnju.

Radnja se predočuje grafički tako, da se u koordinatnom sustavu putovi nanesu kao apscise, a sile kao ordinate. Ako je na putu $s = OA$ (sl. 40.) djelovala sila $p = OC$ radnja je jednaka pravokutniku $OABC$. Ako rukom natežem elastičnu uzvojnicu, sila p raste razmjerno sa produženjem s, te je zakon sile predočen pravcem OE (sl. 41.), koji ide kroz početak O koordinatnoga sustava; radnja na putu $\Delta s = ab$ predočena je vrlo uskim pravokutnim $abcd$, a čitava je radnja jednaka površini trokuta ODE, kojemu su katete krajnja vrijednost produženja OD i sile DE; radnja je dakle $= \frac{1}{2} \cdot OD \cdot DE$. Grafičko predočivanje radnje zamislio je Watt (1782.), te njegov indikator (lat. *indico, odajem*) automatično bilježi radnju kod parostroja.



Sl. 41.

51. Snaga. U tehnici nije svejedno, u kojem vremenu neki stroj izvede određenu radnju. Treba dakle znati, kolika je njegova „brzina radnje" ili snaga. Kako se dijeljenjem puta sa vremenom dobiva brzina gibanja, tako se dijeljenjem radnje w sa vremenom t dobiva brzina radnje, te je snaga

$$S = \frac{w}{t}.$$

Ako se svake sekunde izvede radnja 1 kg*m, snaga je 1 „kg*m u sekundi" ili 1 kg*m/sek. Druga je jedinica snage

$$1\ \text{vat} = 1\ \text{džul u sekundi}.$$

W a t t je uveo (1770.) kao jedinicu snage 1 k o n j s k u s n a g u, pa je u nas 1 KS = 75 kg*m/sek = 75 × 9·81 džul/sek = 736 vat = 0·736 kilovat ≐ ≐ $\frac{3}{4}$ kilovat, u Engleza *Horse Power* (= *konjska snaga*) ili 1 HP = 746 vat.

Motor sa snagom manjom od 6 KS obično se zove malen motor. Snaga tramvajskoga motora može biti na pr. 25 KS, u lokomotive brzovlaka na pr. 2000 KS; najveći parostrojevi imadu i preko 10000 KS; najveće parne turbine do 50000 KS. Snaga Niagarinih vodopada cijeni se oko 7000000 KS. Čovjek može raditi kroz više sati sa snagom većom od 10 kg*m/sek, kroz četvrt sata i sa ½ KS.

U tehnici je pojam snage gotovo znatniji od pojma radnje, pa mu je i jedinica bila prije određena. Zato se i mnogo upotrebljavaju jedinice radnje, koje su izvedene iz jedinice snage: 1 „s a t k o n j s k e s n a g e" i 1 k i l o v a t s a t; to su radnje, koje se izvrše, ako se kroz 1 sat radi sa snagom 1 KS ili pak 1 kilovat. Prema formuli za radnju $w = S \cdot t$ bit će

$$1 \text{ sat KS} = 75 \text{ kg*m/sek} \times 3600 \text{ sek} = 270000 \text{ kg*m},$$
$$1 \text{ kilovatsat} = 1000 \text{ džul/sek} \times 3600 \text{ sek} = 3600000 \text{ džul}.$$

Kod aeroplana stalo je do toga, da motor kraj dostatne snage ne bude pretežak. Ima motora, kojima jo broj KS, veći od broja kg* njihove težine. — Na lađama i u velikim središnjicama za podavanje snage nastoje, da strojevi što veće snage zapreme što manje prostora; u tom su parne turbine bolje od parostroja. — Snaga parostroja, kako se određuje iz podataka indikatora, zove se „i n d i c i r a n a s n a g a"; jedan se dio njezin troši na to, da parostroj s a m a s e b e drži u pogonu; onaj dio snage, kojim se vrši korisna radnja, zove se „k o r i s n a s n a g a".

Zad. **40.** Koliko KS treba, da se teret težak 1500 kg* digne 30 m visoko za 6 min [1 ⅔ KS]

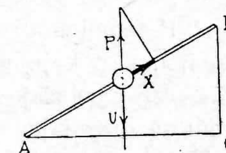
Zad. **41.** Željeznički vlak ide horizontalnom prugom s brzinom 65 km/sat; težina je vlaka 120 tona*, a otpori se uzimlju u račun sa 7·3 kg* za svaku tonu; koliko KS izvodi lokomotiva? [210 KS]

Zad. **42.** Uru tjera utez težak ½ kg*; kolika je brzina radnje, ako se utez za 7 dana spusti 0·78 m? [63 erg/sek]

Zad. **43.** Remen goni kotač nekoga stroja djelujući silom 134 kg* (to je razlika napetosti jedne i druge strane remena); brzina je remena 5·6 m/sek; kolikom se snagom kotač goni? [10 KS]

52. Praktični sustav mjera. U dinamičkom sustavu mjera (isp. § 19.) osnovne su jedinice jedinica dužine, mase i vremena. Ako za njih odaberemo centimetar, gram i sekundu, zovemo sustav mjera centimetar-gram-sekunda-sustav, kraće *c-g-s-sustav*. U taj sustav idu izvedene jedinice din, erg i t. d. U nauci o elektricitetu mnogo se upotrebljava p r a k t i č n i s u s t a v m j e r a (§ 3.); i to je dinamički sustav, ali su mu osnovne jedinice dužine i mase druge negoli u c-g-s-sustavu. U praktičnom je sustavu jedinica radnje 1 džul, jedinica snage 1 vat. Dolazi se do njih iz osnovnih jedinica baš onako, kao i u c-g-s-sustavu. Budući da se jedinice dužine, mase i sile toga sustava ne upotrebljavaju, ne trebamo se ovdje na njih obazreti.

53. Opći pojam radnje. Probušeno tijelo teško U kg neka je navedeno na kosi štap AB (sl. 42.), na kojem se može sklizati bez trenja. Ako vučemo tijelo vertikalno u vis silom $P = U$, tijelo se može jednoliko gibati putom AB. Sila i put imadu sada r a z l i č i t e smjerove. Kolika je radnja? Ista radnja mogla se izvesti i na taj način, da sila X vuče tijelo u smjeru od A prema B. Za taj je slučaj radnja $X \cdot AB$, a budući da je sila X okomita projekcija sile P na smjer puta AB (isp. sl. 8.), to je radnja sile P jednaka u m n o š k u p u t a i p r o j e k c i j e s i l e n a p u t. Ako je CB vertikalna visina puta AB, izlazi iz sličnosti trokuta $X : P = CB : AB$, te je $X \cdot AB = P \cdot CB$. Prema tome je radnja također jednaka u m n o š k u s i l e i p r o j e k c i j e p u t a n a s m j e r s i l e. — Razabiramo, da je radnja dizanja jednaka, dizali mi tijelo do određene visine na kosini AB ili u vertikalnom pravcu CB. — Kad se teško tijelo giblje na horizontalnoj podlozi, zemlja ne vrši radnje, jer je projekcija sile teže na smjer puta = 0. Ako se tijelo giblje jednoliko u kružnici, radnja je centripetalne sile = 0.



Sl. 42.

Zad. **44.** Čovjek težak 75 kg* popne se u sprat visok 15 m za 1 min; kolikom je snagom svladavao silu teže? [¼ KS.]

54. Energija. Za tijelo, koje može vršiti radnju, kažemo, da ima energiju; energija je sposobnost vršiti radnju (grč. prema ἐν, *u;* ἔργον, *radnja*). Energija se mjeri radnjom, što je ona može izvesti, dok se sva ne iscrpe. Dakle su jedinice energije kg*m, erg, džul i t. d.

Kamen bačen brzinom v cm/sec vertikalno u vis dići će se do visine s cm, te je $2gs = v^2$ (isp. §§ 23., 16.). Kamen dižući se vrši radnju, dakle imade energiju; kako ta energija pripada kamenu poradi njegova gibanja, zove se ona e n e r g i j a g i b a n j a ili k i n e t i č k a e n e r g i j a. Kinetička energija kamena bit će iscrpena, kad brzina kamena bude = 0, t. j. kad se kamen popne do najviše točke. Na putu do najviše točke kamen je izvršio radnju $p \cdot s$ erga, ako je $p = mg$ dina težina kamena. Dakle je kinetička energija kamena $p \cdot s = mg \cdot \frac{v^2}{2g} = \frac{mv^2}{2}$ erga. Općeno može se reći: tijelo mase m grama i brzine v cm/sek ima kinetičku energiju $\frac{mv^2}{2}$ erga.

Ako se utez težak p dina digne s cm iznad površine zemaljske i podmetne podloga pod utez, mehanizam sastavljen od Zemlje i uteza ima energiju; makne li se naime podloga, utez će padati i Zemlja će vršiti radnju. Ta radnja traje dotle, dok utez ne stigne na Zemlju, te iznosi $p \cdot s$ erga. Energija, što postoji poradi međusobnoga razmještaja tjelesa ili oblika njihova, zove se e n e r g i j a p o l o ž a j a ili p o t e n c i j a l n a e n e r g i j a; na pr. energija uteza u visini, energija napetoga elastičnoga pera. (Lat. *potentia, mogućnost, moć.*)

Utez ima u nekoj točki A onoliku potencijaluu energiju, koliku bi imao u kojojgod drugoj jednako visokoj točki B. Doista ako se utez spušta do neke točke C pravcem AC ili pravcem BC, radnje su jednake (§ 53.).

Potencijalna i kinetička energija mogu postojati i istodobno; kad kamen pada, ima u kojojgod točki svoga puta energiju gibanja zbog svoje brzine, a energiju položaja zbog svoje visine. Pokazalo se, da u mehanizmu, u kojemu se događaju samo mehanički pojavi, a nema sveze s ostalim svijetom, vrijedi zakon energije: zbroj je potencijalne i kinetičke energije stalan. Objasnit će to ovi primjeri.

Tijelo, koje se skliže bez trenja na horizontalnoj ravnini, giblje se jednoliko, dakle mu je kinetička energija stalna; kako mu se visina ne mijenja, ostaje i potencijalna energija stalna, te se ni zbroj energija ne mijenja.

Neka tijelo teško p dina prosto pada iz visine S cm; kad je palo do visine x cm, potencijalna mu je energija $p \cdot x$ erga; ako je u toj visini brzina v cm/sek, kinetička je energija $\frac{m v^2}{2}$ erga, gdje je m masa tijela. Iz zakona prostoga pada lako izlazi, da je $p \cdot x + \frac{m v^2}{2} = p \cdot S$, dakle stalno.

U § 39. spomenuto je, da tijelo koje se pod utjecajem sile teže giblje u krivulji, u jednakim visinama ima jednake brzine. To izlazi i iz gornje tvrdnje o zbroju energija. U točkama jednake visine potencijalne su energije jednake; kako se zbroj energija ne mijenja, bit će u tim točkama i kinetičke energije jednake, dakle su i brzine jednake.

Kod sraza elastičnih kugala vrijedi ovo: Ni prije ni poslije sraza nema mehaničke sveze među kuglama, dakle je potencijalna energija prije sraza i poslije sraza = 0. Kako je zbroj svih energija stalan, to je dakle zbroj samih kinetičkih energija prije sraza jednak zbroju njihovu poslije sraza: $\frac{mv_2^2}{2} + \frac{\mu \varphi_2^2}{2} = \frac{mv_1^2}{2} + \frac{\mu \varphi_1^2}{2}$ (Huygens). Ta se jednadžba algebarski izvodi iz zakona veličina gibanja i zakona relativnih brzina (§ 30. Dokažite!).

Kad utez ure njihalice pada, potencijalna se energija umanjuje, a da ipak kinetička energija ne naraste ni do kakve znatnije vrijednosti. Prema tome se zbroj potencijalne i kinetičke energije umanjuje. U tom se mehanizmu trenjem stvara toplina, te nam se gibanje mehanizma ne prikazuje kao puki mehanički pojav. Slično vrijedi za sraz neelastičnih kugala, gdje je zbroj kinetičkih energija poslije sraza manji negoli prije sraza. Ti se pojavi objašnjavaju općim zakonom energije, s kojim ćemo se upoznati u nauci o toplini.

Zad. 45. Kolika je kinetička energija taneta, teškoga 917 kg*, koje izleti iz topa s brzinom 523 m/sek (na vrtnju taneta ne obaziremo se)? Ako je tane put u topovskoj cijevi prevalilo za 0·01 sek, kolika je bila brzina radnje u topu? [12400000 kg*m, 16500000 KS]

55. Perpetuum mobile. Sa zakonom je energije u uskoj svezi, kad kažemo, da se ne može načiniti perpetuum mobile (lat. *perpetuus, postojan* i *mobilis, pomičan*). To bi bio stroj, koji s ostalim svijetom ne bi imao druge sveze van što bi vršio koliko mu drago korisne radnje. Hoćemo li, da ura ide, te vrši radnju svladavajući trenje, treba je navinuti; parostroj i drugi toplinski motori trebaju ugljena, benzina i t. d; mlin radi na trošak potencijalne energije vode; a perpetuum mobile radio bi, a da mu se ništa izvana ne dovodi. Zamisao toga stroja protuslovi zakonu energije. Zamislimo perpetuum mobile, koji diže teret; stroj zajedno sa Zemljom i teretom čini jedan mehanizam. Kad stroj načini jedan „krug" svoga rada, na kraju je kruga u jednakim prilikama kao i na početku, te mu je i energija jednaka; kako se međutim teret digao, povećala se potencijalna energija tereta spram Zemlje, dakle je ukupna energija mehanizma narasla, a to je nemoguće.

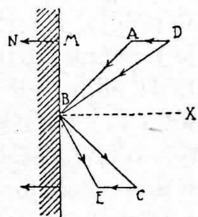
Kad ne bi bilo trenja, njihalo se ne bi nikada primirilo: ni nebeska se tjelesa ne ustavljaju u svojim ophodima. Ipak nijedan taj mehanizam nije perpetuum mobile: oni ne vrše radnje izvanjem svijetu. — Većinu „izuma" perpetua mobila rodilo je neznanje i površnost ili ća želja za prevarom. U nauci je vazda prevladavalo uvjerenje, da se perpetuum mobile ne da načiniti, i tome uvjerenju treba zahvaliti gdjekoji napredak nauke još u doba prije otkrića zakona energije. Pariska je akademija g. 1775. zaključila, da ne će više ispitati nijednoga takvog izuma.

56. Teorem relativnosti. Gibanje se tijela određuje s obzirom na okolišna tjelesa. Za čovjeka, koji šeće u željezničkim kolima, kažemo, da ima drugo „relativno" gibanje s obzirom na kola, drugo s obzirom na Zemlju. (Lat. *relativus, odnosni.*)

Neukom se čovjeku Zemlja pričinja kao beskrajno veliko tijelo, koje miruje. Taj je nazor o „apsolutnom" (lat. *absolutus, savršen*) mirovanju Zemlje prešao i u znanost i u njoj vladao sve do Kopernika, premda mu nedostajaše jasan smisao. Apsolutno mirovanje bilo bi mirovanje s obzirom na neki „apsolutni prostor", ali točke toga prostora nijesu za nas nikako obilježene, te ne možemo saznati, mijenja li tijelo svoj položaj prema njemu ili ne mijenja. Slično vrijedi i za apsolutno gibanje, a ipak je znanost sve do najnovijega doba te pomisli pridržala, pa se i Newtonova mehanika na njih oslanja.

Ako mehaničke pokuse pravimo u željezničkim kolima, koja su u jednolikoj translaciji, a ni ne mislimo na gibanje kola, pričinjaju nam se pojavi onakovima kao i u mirnoj sobi. Na pr. za prosti pad u kolima (što je za motrioca na zemlji horizontalni hitac) vrijede isti oni zakoni kao i za prosti pad u mirnoj sobi. To je u skladu s teoremom relativnosti, koji se može izvesti iz aksioma Newtonove mehanike i glasi: zakoni

Newtonove mehanike jednaki su za motrioca, koji apsolutno miruje, i za motrioca, koji se — i ne znajući toga — nalazi u apsolutoj jednolikoj translaciji. — Odatle slijedi, da se nikojim ispitivanjem mehaničkih pojava ne može pronaći, kolika je apsolutna jednolika translacija nekoga tijela.



Sl. 43.

Uz pomoć zakona relativnosti mogu se gdjekoje mehaničke zadaće svesti na jednostavnije. Riješit ćemo na pr. zadaću, kako se odbija elastična kugla od elastične ploče, koja se giblje. Brzina ploče neka je dana dužinom MN okomitom na ploču (sl. 43). Ako je AB relativna brzina kugle spram ploče prije sraza, BC relativna brzina poslije sraza, vrijede zakoni § 35., da je $BC = AB$ i da te brzine čine s okomicom jednake kutove. Doda li se relativnim brzinama brzina ploče $DA = CE = MN$, izlazi brzina kugle prije sraza DB, a poslije sraza BE. Ako je zadano DB i MN, može se BE lako konstruirati.

U drugu ruku Newtonova mehanika ipak uči, da se apsolutna vrtnja dade dokučiti, pa nam u smislu te nauke Foucaultov pokus dokazuje apsolutnu vrtnju Zemlje i prema istoj toj nauci mogla bi se ta vrtnja Zemlje Foucaultovim pokusom i onda utvrditi, kad bi Zemlja bila sama u Svemiru. No pristaše teorije relativnosti drže, da se ne može nikakvo apsolutno gibanje utvrditi, pa je zato taj pojam nauci suvišan; što bi bilo, da je Zemlja sama u Svemiru, toga ne znamo, a pojavi kao kod Foucaultova pokusa da dolaze otuda, što se Zemlja vrti relativno spram stajačica. (Mach 1883.)

57. „Nova“ mehanika. Mehanika osnovana na Newtonovim aksiomima, na zamisli apsolutnog prostora i vremena i na običnoj („Euklidovoj“) geometriji zove se Newtonova ili klasična mehanika. Sve do početka ovoga stoljeća nije bio poznat pojav, koji bi joj jasno protuslovio, a potvrde koje je nalazila u astronomskim pojavima i računima, bile su toliko točne, da su mnogi smatrali tu klasičnu mehaniku neoborivom. Međutim je nauka o relativnosti (Einstein 1905. itd.) vodila na „novu“ mehaniku, koja je u osnovima različna od Newtonove. Sa stajališta nove mehanike Newtonova se mehanika prikazivala tako točnom zato, jer se primjenjivala samo na pojave, u kojima su brzine tjelesa bile „malene“; a kod malenih brzina Newtonova mehanika daje približno jednake rezultate kao i nova. Što veće su brzine, to više se gubi točnost klasične mehanike, a kod najvećih brzina, s kakvima se znanost upoznala na pr. kod pojava radioaktivnosti, ta mehanika ne vrijedi više nikako. Pri tom je „malena“ brzina ona, koja je malena spram brzine „c“, kojom svjetlost leti kroz prazan prostor (c = 300 000 km/sek = 3×10^{10} cm/sek), te je na pr. čak i brzina Zemlje na njezinu putu oko Sunca u tom smislu malena (0·0001 c).

Značajne tvrdnje nove mehanike:

1. Nijedno tijelo ne može postići brzinu veću od c.
2. S time u svezi: masa tijela (u Newtonovoj mehanici konstantna!) raste, kada raste brzina, pa kada se brzina približuje vrijednosti c, masa mu raste u beskrajnost. Budući da prema zakonu $p = ma$ iz $m = \infty$ izlazi $a = 0$, ne bi više bilo akceleracije, kad bi se dostigla brzina svjetlosti.

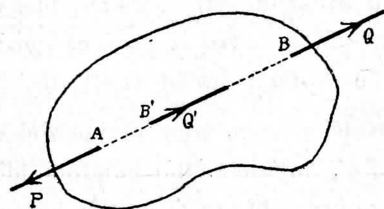
3. Sastavljanje brzina. Motrilac uz željezničku prugu mjeri brzinu vlaka v, motrilac u vlaku neka izmjeri brzinu ptice v', koja leti istim smjerom, ali brže nego vlak. Prema Newtonovoj mehanici za prvog bi motrioca bila brzina ptice $v + v'$; prema novoj mehanici te se brzine sastavljaju po zamršenijem zakonu, koji ne dopušta, da bi ikojim sastavljanjem brzina za bilo kojega motrioca mogla izaći brzina veća od c.

4. Masa i energija u novoj su mehanici ekvivalentne. Ta nauka dopušta, da bi se ono, što mjerimo gramima moglo pretvoriti u ono, što mjerimo ergima, ili obratno, i to prema omjeru, da je 1 gram ekvivalentan sa $c^2 = 9 \times 10^{20}$ erg. Da je moguće po volji izazvati takve pretvorbe, mogla bi se bila sva energija, koju je proizvela zagrebačka munjara u g. 1939. t. j. 60 miljuna kilovatsati, dobiti uništenjem 2·4 grama tvari. (Izračunajte!)

5. Gibanje nebeskih tjelesa u novoj je mehanici puka posljedica zamršenih svojstava prostora („neeuklidskog“), te za tu mehaniku pitanje sile gravitacije (§49.) ne postoji. Razmotrimo sa gledišta stare mehanike primjer, da se naša soba nalazi negdje, gdje nema sile teže, i da sobu netko vuče, te se ona giblje jednoliko ubrzano s akceleracijom 9·8 m/sek² u smjeru, koji ćemo zvati „prema gore“. Tijelo, koje počiva na tlima, ima istu akceleraciju, a sila, koja mu podjeljuje akceleraciju, jest pritisak tla. Taj pritisak djeluje prema gore, a tijelo pritiskuje na tle silom jednakom i protivnom. Tijelo se dakle pričinja teškim. Pustimo li u toj sobi tijelo iz ruke, ne djeluje na nj nikakva sila, pa je apsolutno gibanje tijela jednoliko gibanje u pravcu, dok je relativno gibanje spram sobe jednoliko ubrzano, upravo prosti pad. Mehanički nam se dakle pojavi u tom slučaju pričinjaju tako, kanda smo u prostoru, u kojemu djeluje sila teže „prema dolje“. Na osnovu tih pojava ne možemo reći, je li soba u apsolutnoj jednoliko ubrzanoj translaciji u prostoru, gdje ne vlada teža, ili soba nema akceleracije, ali djeluje teža. Taj primjer neka donekle objasni, zašto nova mehanika gravitaciju dovodi u svezu s naukom o prostoru i vremenu (Einstein 1913.).

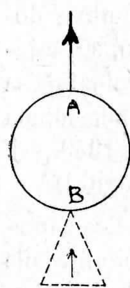
2. Mehanika čvrstoga tijela

58. Čvrsto tijelo. Ako je razmak kojihgod česti tijela malne nepromjenljiv, zovemo tijelo čvrstim. Isprva ćemo radi jednostavnosti pomišljati, da je težina čvrstoga tijela neznatna spram sila, kojih djelovanje ispitujemo. Točka čvrstoga tijela, u kojoj djeluje sila, zove se hvatište sile.



Sl. 44.

Na čvrsto tijelo neka djeluju dvije sile P i Q jednake i protivne; smjerovi tih sila neka leže u spojnici njihovih hvatišta A i B (sl. 40.). Te dvije sile drže sebi ravnotežu. (Primjer: natezanje tijela sa dva užeta, kojih je jedno privezano u A, drugo u B.) Ako silu Q sa hvatištem B nadomjestimo jednakom silom $Q' = Q$, kojoj je hvatište B' na spojnici AB, bit će opet ravnoteža. Razabiramo, da se hvatište sile, što djeluje na čvrsto tijelo, može u pravcu sile kamogod premjestiti.



Sl. 45.

Treba napomenuti, da tim premještanjem mogu ipak nastati promjene u ravnoteži. Na pr. ako tešku kuglu jedamput objesimo na užetu u točki A (sl. 45.), a drugi je puta podupremo šiljkom u točki B baš ispod A, pritisak šiljka i napetost užeta djeluje u istom pravcu, a ipak će se u drugom slučaju kugla prevrnuti. U prvom je primjeru ravnoteža prava ili stabilna (lat. *stabilis, nepokolebiv*), u drugom samo pomišljana ili labilna (lat. *labes, pad*).

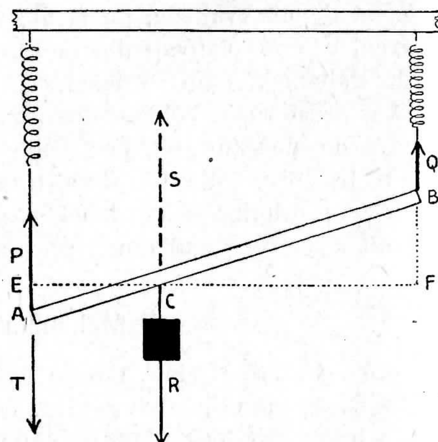
59. Sastavljanje sila. Lak štap AB (sl. 46.) neka je u krajnjim točkama obješen paralelnim užetima na dvije perne vage; u točki C štapa neka visi utez težak R kg*. Vage pokazuju silu P, kojom vuče uže na kraju A, i silu Q, kojom vuče uže na kraju B. Pokus pokazuje, da je

$$P + Q = R, \quad P : Q = BC : AC.$$

Potonji se omjer može također pisati $FC : EC$, gdje je FC horizontalni razmak točke B od C, EC horizontalni razmak točke A od C.

Sile P i Q drže ravnotežu sili R, no sa silom R bila bi u ravnoteži također sila S, koja je jednaka i protivna sili R, a djelovala bi u točki C. Dakle bi se mogle sile P i Q nadomjestiti silom S; ona je njihova rezultanta. Za rezultantu usporednih sila istoga smjera vrijedi prema tome ovo:

1.) ona je jednaka zbroju komponenata, 2.) njezin je smjer isti koji je smjer komponenata, 3.) njezin pravac leži u ravnini pravaca komponenata i to između potonjih pravaca, 4.) udaljenosti komponenata od rezultante obrnuto su razmjerne komponentama.



Sl. 46.

Rezultanta od 3 ili još više usporednih sila istoga smjera nađe se, ako najprije dvije sile sastavimo, onda njihovu rezultantu sa trećom i t. d. Dakle je veličina rezultante jednaka zbroju svih komponenata.

Iz gornje slike razabiramo i to, da je rezultanta sila R i Q jednaka sili T, koja je jednaka i protivna sili P, a djeluje u hvatištu A. Po tome vidimo, kako se sastavljaju sile, koje su usporedne i protivnih smjerova. — Ako su sile R i Q samo sasvim malo različne, onda je njihova rezultanta T neznatna, a hvatište se A nalazi u silnoj udaljenosti. U praksi to znači, da se dvije sile usporedne protivnih smjerova, ako su gotovo jednake, ne daju nadomjestiti jednom silom. Dvije jednake sile usporednih pravaca i protivnih smjerova nemaju rezultante; one se zovu sile dvojice.

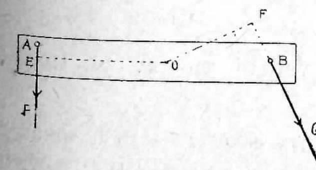
Sile, kojima se pravci presijecaju, mogu se sastaviti u rezultantu, ako hvatište svake komponente prenesemo u presjecište pravaca sila i onda konstruiramo paralelogram sila. — Ako je presjecište sila AB i CD daleko (sl. 47.), možemo izvesti ovu konstrukciju (Majcen 1915.): spojimo A i D, B i C, načinimo AE i $DF \parallel BC$, zatim CE i $BF \parallel AD$; dobivena presjecišta E i F jesu početak i kraj rezultante. Za dokaz spojimo još A sa C. Sila AB dade se zamijeniti silama AC i CB, koje djeluju u točki A; onda se hvatište sile CB premjesti iz A u E, te ona bude EG. Isto tako se može sila CD zamijeniti silama CA i EH. Sile AC i CA jedna drugu uništavaju, te preostanu kao zamjena zadanih sila sile EG i EH. Njihova je pak rezultanta EF. — Budući da ta konstrukcija vrijedi i onda, kad je $AB \parallel CD$, može ona služiti kao osnov za teoretski izvod gornjih formula.

Sl. 47.

Zad. 46. Na brvnu poduprtom na krajevima A i B, a dugačkom 8 m stoji čovjek težak 70 kg* i to 1 m daleko od kraja A; kolik pritisak osim pritiska od težine brvna podnose potporišta?

60. Zakon poluge. Kad se čvrsto tijelo, na koje osim teže djeluju još i druge sile, može samo tako gibati, da jedan pravac toga tijela ne mijenja položaja, zove se tijelo poluga; spomenuti pravac je os poluge. Udaljenost osi od pravca sile zove se krak sile. Zakon poluge kazuje, kada su sile, što djeluju na polugu, u ravnoteži. Obično su pravci sila okomiti na os poluge, pa za taj slučaj vrijedi zakon: da dvije sile drže sebi na poluzi ravnotežu, treba da su obrnuto razmjerne sa svojim kracima. N. pr. ako sila P sa hvatištem A (sl. 48.) ima krak EO, a sila Q sa hvatištem B ima krak FO, onda je uvjet ravnoteže

$$P : Q = OF : OE.$$



Sl. 48.

(U najjednostavnijim primjerima zakon poznat već Aristotelu.)

Zakon se poluge može pisati i ovako

$$P \cdot OE = Q \cdot OF.$$

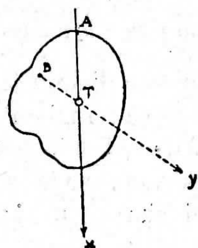
Ako se umnožak sile i kraka njezina zove momenat sile s obzirom na os poluge ili ukratko momenat, može se dakle reći:

da dvije sile na poluzi budu u ravnoteži, treba da su njihovi momenti jednaki. Izraz „momenat" (Galilei) znači ovdje „nešto znatno" (lat. *momentum, što je znatno, uzrok*).

U tom se obliku zakon poluge može proširiti na primjere, u kojima ima više sila. Ako se momenti sila, koje nastoje polugu zakrenuti onako, kako se vrte kazala na uri, obilježe pozitivnim predznakom, a ostali negativnim, vrijedi kod ravnoteže zakon, da je zbroj pozitivnih momenata apsolutno jednak zbroju negativnih momenata, ili drukčije: algebarski je zbroj svih momenata $= 0$.

61. Težište. Čvrsto tijelo možemo u misli rastaviti u mnogo malenih čestica. Sile, kojima Zemlja privlači te čestice, jedna su drugoj usporedne; rezultanta je njihova dakle jednaka njihovu zbroju; ta se rezultanta zove težina tijela. Pravac, u kojemu djeluje težina, zove se težišnica.

Kako je pravac težine vazda vertikalan, premješta se on u tijelu, kad tijelo zakrenemo. Prema tome ima u tijelu bezbroj težišnica. Svaka težišnica presijeca sve ostale, pa se njihovo zajedničko presjecište zove težište tijela. Ovo međusobno presijecanje težišnica dade se teoretski utvrditi, a pokusom se pokazuje ovako. Objesimo tijelo u kojojgod njegovoj točki A (sl. 49.); kad se tijelo umiri, pravac težine Ax mora da ide točkom A, jer samo onda može težini držati ravnotežu sila, što u točki A nosi tijelo; zabilježimo u tijelu položaj težišnice Ax. Iza toga objesimo tijelo u drugoj jednoj točki B, te jednakim načinom odredimo težišnicu By i t. d. Težišnice Ax, By . . . presijecaju se, pa se tim postupkom odmah odredilo i težište T. — Kad bi se čvrsto tijelo moglo objesiti baš točno u težištu, ono bi moglo mirovati u kojemgod položaju (Papo [Πάππος] 300. posl. Kr.); takva bi se ravnoteža zvala indiferentna (lat. *indifferens, koji se ne razlikuje*).

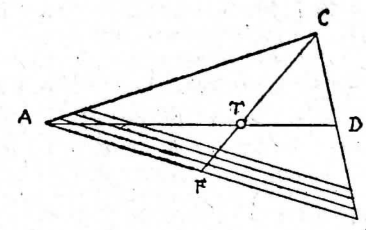


Sl. 49.

Težište može biti i izvan tvari tijela; to vrijedi na pr. za težište prstena.

U gdjekojim se primjerima težište lako određuje i bez pokusa. — Radi simetrije slijedi, da je težište homogenoga štapa jednake debljine u sredini štapa. Težište je homogene kugle u središtu njezinom. Ako se homogena ploča stalne debljine izreže u oblik

paralelograma, težište je u presjeku diagonala. U tom primjeru može se ukratko govoriti o težištu „paralelograma", a jednako se može i općeno govoriti o težištu ravnih likova. — Da se nađe težište trokuta ABC (sl. 50.), rastavi se trokut u uske pruge, koje su usporedne stranici AB. Rezultanta težina čestica svake pruge ide kroz sredinu pruge. Sredine pruga leže na pravcu FC, što spaja sredinu stranice AB sa suprotnim vrhom C. Dakle se sve težine čestica trokuta dadu nadomjestiti silama, kojih pravci presijecaju pravac FC; prema tome mora i rezultanta svih tih sila presijecati taj pravac. Težište trokuta ABC leži dakle negdje na pravcn FC; jednako se pokazuje, da ono leži negdje u pravcu DA, koji spaja sredinu stranice BC, s vrhom A. Težište je dakle u presjeku T pravaca FC i DA (Arhimed, 'Αρχιμήδης, najznatniji matematik staroga vijeka, 287.—212. pr. Kr.) U geometriji se pokazuje, da je $FT = \frac{1}{3} FC$.



Sl. 50.

Opći naputak za računsko određivanje težišta dobiva se ovako. Zamislimo, da je tijelo $\alpha\beta\gamma\delta$, kojemu hoćemo odrediti težište, na poluzi (sl. 51.). Ako čestice tijela imadu mase m_1, m_2, m_3 . . ., težine su čestica m_1g, m_2g, m_3g . . . Ako je x_1 krak težine 1. čestice, x_2 krak težine 2. čestice i t. d., zbroj je momenata svih tih težina $m_1gx_1 + m_2gx_2 + \ldots$ Tijelu bi moglo držati ravnotežu sasvim simetrično tijelo, koje je simetrično namješteno na drugoj strani poluge. Težine čestica toga tijela nadomjestimo te inom tijela $m_1g + m_2g + \ldots$; ta težina djeluje u težištu T a krak njezin neka je ξ. Po zakonu je poluge

Sl. 51.

$$(m_1g + m_2g + \ldots)\, \xi = m_1gx_1 + m_2gx_2 + \ldots$$

Odatle slijedi

$$\xi = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + \ldots}{m_1 + m_1 + \ldots}.$$

Ako se položi kroz os poluge vertikalna ravnina, veličine x_1, x_2, . . . označuju udaljenosti čestica od te ravnine, a veličina ξ udaljenost težišta T. Gornja formula sadrži dakle naputak, kako se računom određuje udaljenost težišta od neke ravnine.

S pojmom se težišta susrećemo ne samo kod čvrstih tjelesa, već je i drugdje u mehanici važna ona točka, kojoj se položaj određuje po gornjoformuli. Općeno se ta točka zove središte masa. (Na pr. središte masa sunčanoga sustava.) Težište čovjekovo premješta se u tijelu, kad se mijenja oblik tijela; kad čovjek skoči u daljinu i pri tome kakogod mijenja svoj oblik, težište njegovo opisuje parabolu kao i kamen kod kosoga hica.

Zad. 47. Žica je dva puta svinuta, te čini tri stranice kvadrata; neka se odredi težište 1.) računom 2.) pokusom.

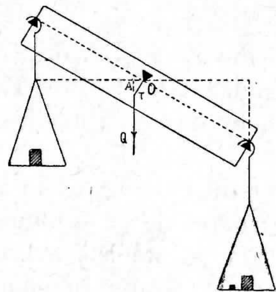
Zad. 48. Štap dugačak 2 m, težak 5 kg* leži na tlima; koliku radnju treba izvesti, da se štap postavi vertikalno?

Zad. 49. Na stolu stoje vertikalno dva štapa od iste tvari; kolik je omjer njihovih potencijalnih energija, ako je omjer dužina = n i omjer debljina = n? [n^4]

62. Obična vaga. Bitni je dio obične vage poluga, na koju djeluje sjedne strane težina vaganoga predmeta, s druge strane težina uteza, a kraci su tih sila jednaki („vaga jednakih krakova"!). Poluga vage zove se i priječka. Prijećka je građena simetrično prema jednoj ravnini, u kojoj se nalazi horizontalno namještena os vage. Os je vage tvarno izvedena kao brid malene čelične prizme; ovaj brid počiva na dva tvrda ležaja Zdjelice, što vise na krajevima prijećke, treba da su (zajedno s uredbom za vješanje) jednake težine. Na krajevima prijećke nalazi se po jedan čelični brid, usporedan s osi; zdjelice vise na tim bridovima, pa je udaljenost brida za vješanje od ravnine simetrije prijećke jednaka kraku vage. Ako su zdjelice jednako opterećene, vaga je u ravnoteži t. j. ravnina je simetrije vertikalna. Da se uglavi ravnoteža, nalazi se na prijećki jezičac, koji se njiše pred ljestvicom. Umjesto da se čeka, dok se vaga primiri u položaju ravnoteže, možemo ravnotežu prosuditi po tom, dokle ide jezičac kod njihanja vage na jednu i drugu stranu. (Običnu vagu nalazimo u Egiptu već u 3. tisućljeću prije Krista.)

Vaga je osjetljiva, ako je malen preteg znatno zakrene iz položaja ravnoteže. Kako treba da je načinjena vaga, da bude što osjetljivija?

1.) Težina pretega ima to veći momenat, što je veći krak vage; očekujemo dakle, da će vaga biti to osjetljivija, što su joj kraci duži. — 2.) Na osjetljivost utječe položaj težišta prijećke T (sl. 52.); ako je težište duboko ispod osi O, imat će težina prijećke velik krak OA, kad se vaga makne iz položaja ravnoteže; težina će prijećke dakle znatno sprečavati zakretanje vage, te je vaga slabo osjetljiva. Treba dakle da težište bude dosta blizu osi; no ipak ono ne smije biti preblizu, jer inače vaga njiše tako sporo, da vaganje iziskuje odveć vremena. — 3.) Ako je težina prijećke Q velika, momenat je njezin $Q \cdot OA$ velik, pa je opet vaga slabo osjetljiva. Da bude vaga osjetljiva, treba da joj je prijećka laka; no onda ona ne može biti duga, kako se zahtijevalo pod 1.) Novije vage imadu kratke prijećke. — 4.) Obično su bridovi za vješanje zdjelica u istoj ravnini sa osi. Kod zakretanja vage krak tereta ostaje onda jednak kraku uteza, pa im i momenti ostaju jedan drugome jednaki, te oni niti pogoduju zakretanju niti mu odmažu. Osjetljivost takve vage dakle ne zavisi o opterećenju njezinu.



Sl. 52.

Vaga je prava, ako su joj kraci jednako dugi s onolikom točnošću, kolika je primjerena točnosti, kojom želimo vagati. Kod najtočnijih vaganja ne ćemo se uzdati, da su kraci jednaki, pa važemo ovako (Gaussova metoda): tijelo, koje važemo, stavi se u lijevu zdjelicu, pa mu drže ravnotežu utezi P; onda se tijelo stavi u desnu zdjelicu, pa za ravnotežu trebaju utezi P'; može se pokazati, da je tražena težina $x = \frac{1}{2} \cdot (P + P')$.

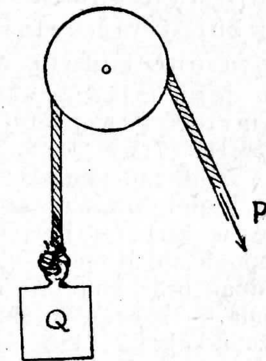
Kod kantara ili rimske vage treba samo jedan utez; utez se može osi približiti ili od nje udaljiti, da mu se momenat promijeni. — I kod skandinavske vage treba samo jedan utez; njegovo je mjesto stalno, a premještati se može os vage.

Kod finijih mjerenja s običnom vagom služimo se jahačem. Najsitniji se utez vage izradio tako, da može „jahati" na prijećki. Ako je jahač na kraju prijećke, vrijedi toliko kao jednako težak utez u zdjelici; ako je bliže osi, nadomješta on utez još sitniji.

Mehanizam je decimalne vage takav, da teretu drži ravnotežu utez, koji ima $\frac{1}{10}$ težine tereta (isp. § 64), pa se mogu malenim utezima mjeriti veliki tereti. Za još veće terete služe vage s "prenosom" $\frac{1}{100}$ ili $\frac{1}{1000}$. Potonje vage mogu podnijeti na desetke tona. — Od početka našega vijeka širi se upotreba automatskih vaga. Mikrovaga, može nam mjeriti težine, koje jedva premašuju 10^{-9} g* (= miljuntina miligrama).

63. Poluga kao stroj. Stroj je uredba, s pomoću koje zadanom silom izvodimo drugu silu, koja je prikladnija za radnju negoli zadana sila. Poluga ide među jednostavne strojeve, što ih već starodobni mehaničari spominju. Kod nje može malena sila držati ravnotežu velikoj; prema tome možemo u nekom radu s pomoću poluge veliku silu svladavati malenom. Primjenjujući strojeve mijenjamo i smjer sile. Tako se polugom može dizati teret u vis, dok sila, što je izvodimo, djeluje prema dolje.

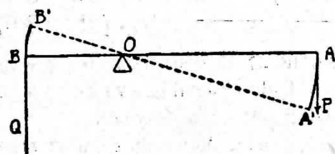
„Nepomična kolotura" i „kolo i vreteno" također idu među jednostavne strojeve. Nepomična je kolotura kotač (sl. 53.), koji se može vrtjeti oko učvršćene osi, a ima u obodu žlijeb, kroz koji je provučeno uže. Kolotura je u ravnoteži, ako je uže na oba kraja jednako napeto. Da nepomičnom koloturom na pr. dižemo teret Q kg*, treba uže vući silom $P = Q$. Vrijednost je nepomične koloture u tom, da mijenja smjer sile. — Kolo i vreteno dobije se, ako se kolo čvrsto spoji s valjkom manjega promjera tako, da im se osi podudaraju; oko toga valjka, t. zv. vretena, namotano je uže, na kojem visi teret, što ga hoćemo dići; na obod kola djelujemo drugim užetom (kao kod nepomične koloture) ili ga hvatamo za ručku, koja je na obodu učvršćena. Uvjet ravnoteže izlazi po zakonu poluge. Sile, kojima uže djeluje na tu polugu, jesu koje tlakovi koje sile trenja; ako se trenjem ne potroši sva napetost užeta, uže djeluje još i na točku, u kojoj je na vreteno privezano. Dade se pokazati,



Sl. 53.

da sve te sile zajedno djeluju tako, kao da je uže privezano u onoj točki, u kojoj se od vretena odvaja.

Među jednostavne strojeve ubrajamo i kosinu (§§ 11., 53.) i srodne joj strojeve vijak i klin.



Sl. 54.

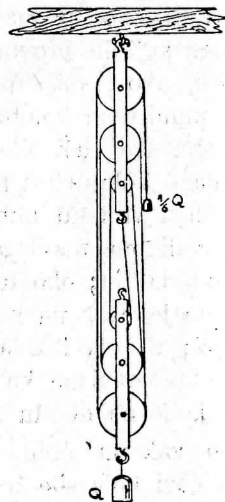
64. Radnja kod poluge. Na poluzi AOB (sl. 54.) neka utez P kg* sa krakom OA drži ravnotežu utezu Q kg* sa krakom OB, te je $P : Q = OB : OA$. Kad bismo sasvim malo na pr. rukom polugu zakrenuli oko osi, točka bi A opisala malen luk AA' kruga, kojemu je polumjer OA; tako isto bi točka B opisala luk BB'. Budući da je $BB' : AA' = OB : OA$, bit će $P : Q = BB' : AA'$ ili

$$P \cdot AA' = Q \cdot BB'.$$

Na svakoj je strani te jednadžbe umnožak sile i puta, dakle radnja. Kako nijesmo poluge doista zaokrenuli, te su radnje samo pomišljene, pa se zovu virtualne radnje (franc. *virtuel, što bi moglo biti, ali nije*). Naša jednadžba dakle kaže, da su kod poluge, koja je u ravnoteži, virtualne radnje jednake. Ako se radnja teže kod spuštanja uteza A označi pozitivnim predznakom, radnja je teže kod uteza B negativna, pa jednadžba glasi uzimajući obzir na predznakove: $P \cdot AA' = - Q \cdot BB'$ ili

$$P \cdot AA' + Q \cdot BB' = 0.$$

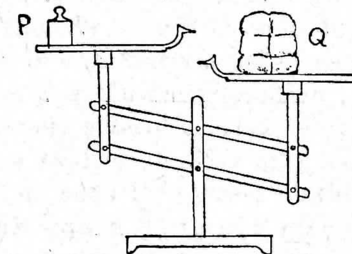
Kad je ravnoteža, zbroj je virtualnih radnja = 0. Može se pokazati, da taj poučak vrijedi i kod zamršenijih primjena zakona poluge, a potanjim ispitivanjem raznovrsnih mehanizama izlazi, da vrijedi sasvim općeno: kojigod mehanizam bit će u ravnoteži, ako je zbroj virtualnih radnja = 0; virtualne jesu one radnje, što bi se izvršile, kad bi se mehanizam vrlo malo pokrenuo, a da mu se pri tom sastav ne poremeti. (Jean Bernoulli 1717.).



Sl. 55.

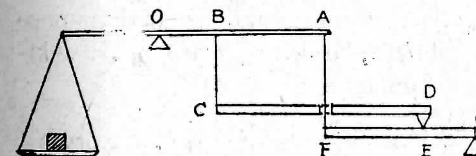
Da taj poučak vrijedi na pr. kod ravnoteže na kosini, razabira se iz § 53. — Kod Arhimedova koloturja (sl. 55.) dva procjepa, jedan nepomičan, drugi — ispod njega — pomičan, nose jednak broj kolotura na pr. po 3; teret Q g* visi onda — kako se iz slike razabira — na 6 usporednih užeta, koja su jedno produženje drugoga, te su jednako napeta. Svako uže nosi dakle $^1/_6$ tereta, pa je i sila, kojom ruka nateže slobodni kraj užeta, $= {}^1/_6\, Q$ g*. Potegne li ruka uže za 6 cm, teret se digne za 1 cm, te je ruka izvršila radnju $^1/_6\, Q \cdot 6$ g* cm, dok je teža izvršila negativnu radnju $Q \cdot 1$ g* cm; dakle spomenuti poučak vrijedi i ovdje.

Pokazalo se, da se u mnogim primjerima uvjet ravnoteže laglje može naći polazeći od zakona virtualnih radnja negoli drugim koji načinom. S obzirom na to, taj se zakon može staviti na čelo cijeloj statici, pa se onda zove princip virtualnih radnja.



Sl. 56.

Primjeri. Vaga de Robervalova (g. 1670.). Kod nje su, kako slika (sl. 56.) pokazuje, virtualni pomaci svih točaka jedne i druge zdjelice međusobno jednaki. Ako utez P drži ravnotežu teretu Q, a virtualni je pomak δ, daje princip virtualnih radnja $P \cdot \delta - Q \cdot \delta = 0$, te je $Q = P$. To vrijedi bez obzira na to, na kojem se mjestu zdjelica nalaze utez i teret. — Kod decimalne mosne vage (Quintenz, Schwilgué 1822.) sve točke mosta CD (sl. 57.) izvode jednake virtualne pomake; u tu svrhu treba da su kraci na polugama tako odabrani, da je u slici $AO : BO = GF : GE$; taj omjer neka je $= n$. Spuste li se točke B i C za 1 mm, točke će se A i F spustiti za n mm, a radi gornjega razmjera E će se spustiti za 1 mm; dakle se točka D spusti koliko i točka C.



Sl. 57.

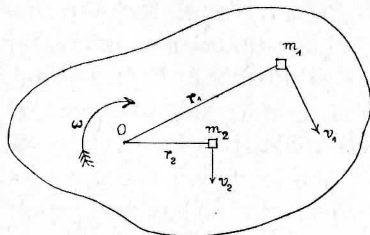
Ako je znatno trenje među dijelovima mehanizma, može biti ravnoteža i onda, kada sile ne udovoljuju zakonu virtualnih radnja. — Jednadžba $P \cdot AA' = Q \cdot BB'$ kod poluge i drugoga kojega stroja važna je s obzirom na praktičnu primjenu strojeva. Ako je radnja doista izvršena, te smo teret Q polugom digli primjenjujući silu P, nismo ništa dobili s obzirom na radnju. Strojem izvršena radnja nije manja ni veća nego što bi bila radnja, da smo je izvršili bez stroja. Ako je kod stroja trebalo primijeniti manju silu, bio je put, na kojem je sila morala raditi, veći.

65. Jednolika vrtnja čvrstoga tijela. Ako se čvrsto tijelo može vrtjeti oko jednog svog pravca, pa ako se kod vrtnje veličina brzine kojegod točke ne mijenja, zove se vrtnja jednolika. U tom slučaju na tijelo ne djeluju sile ili — ako djeluju — sile su u ravnoteži. Taj je zakon za vrtnju toliko važan koliko njemu analogni zakon ustrajnosti u mehanici točke. — Kad se čvrsto tijelo vrti, svaka njegova točka treba jednako vrijeme, da opiše krug, prema tome je kutna brzina ω za sve točke jednaka. (isp. § 37.).

Tijelo, koje se jednoliko vrti, može služiti kao ura; treba samo na

os vrtnje učvrstiti kazaljku i udesiti, da kazaljka šeće ispred brojišta. Teška je bila zadaća načiniti mehanizam sa vrtnjom, koja je makar samo približno jednolika. Već se u 9. vijeku posl. Kr. spominju ure s kotačima gonjene s utezom, ali sve do 17. vijeka bile su te ure posve nepouzdane. Mnoge sredovječne ure bile su evo ovako građene. Utez pokreće najsporiji kotač, taj hvata zupcima u drugi, drugi u treći i t. d, dok je posljednji — najbrži — kotač u svezi s vjetrenjačom; na vjetrenjaču djeluje otpor uzduha, koji je to veći, što je brža vrtnja; ide li ura prebrzo, otpor uzduha naraste i uspori gibanje. U nauci ne upotrebljavahu tih ura; nego se služahu vodenim urama ili klepsidrama (grč. prema κλέπτω, *kradem;* ὕδωρ, *voda*), koje su uz pješčane ure poznate bile već Babiloncima.

Kod strojeva nalazimo zamašnjake. Zamašnjak je kotač velike mase, koji u vrtnji imade veliku kinetičku energiju. Vrtnja je stroja sa zamašnjakom gotovo jednolika, jer je teško promijeniti brzinu zamašnjaka. Što je veća kinetička energija zamašnjaka, to veću radnju treba izvršiti, kad mu kutnu brzinu umanjujemo ili povećavamo. Da se odredi kinetička energija tijela u vrtnji, rastavimo tijelo u misli na mnogo malenih česti m_1 (sl. 58.), m_2, m_3 . . . grama; ako je brzina prve česti v_1 cm/sek, druge v_2, treće v_3 . . ., kinetička je energija


Sl. 58.

$$E = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} + \frac{m_3 v_3^2}{2} + \ldots \text{ erg.}$$

Ako su ω kutna brzina, r_1, r_2, r_3 . . . cm razmaci prve, druge, treće . . . česti od osi, bit će $v_1 = r_1\,\omega$, $v_2 = r_2\,\omega$, $v_3 = r_3\,\omega$ . . . (isp. § 37.), te je

$$E = \frac{m_1\,r_1^2\,\omega^2}{2} + \frac{m_2\,r_2^2\,\omega^2}{2} + \frac{m_3\,r_3^2\,\omega^2}{2} + \ldots =$$

$$= \frac{\omega^2}{2}\,(m_1\,r_1^2 + m_2\,r_2^2 + m_3\,r_3^2 + \ldots).$$

Izraz u zagradama važan je za dinamiku čvrstoga tijela, pa ima osobito ime: „momenat ustrajnosti (s obzirom na zadanu os)“. Kratko ga bilježimo

$$U = \Sigma\; mr^2$$

(„zbroj svih mr^2“). Što je veće U, to je teže promijeniti brzinu vrtnje.

66. Jednoliko ubrzana vrtnja. Ako se kotač stavi u vrtnju utezom, a trenje je maleno, vrtnja je jednoliko ubrzana. To će reći, da za veličinu zakreta σ u vremenu t vrijedi jednadžba $\sigma = \frac{\alpha\,t^2}{2}$, koja sasvim nalići jednadžbi $s = \frac{a\,t^2}{2}$, što vrijedi za jednoliko ubrzano gibanje točke.

Veličina α jest brzina, kojom raste kutna brzina, pa se zove „kutna akceleracija“. Zakon jednoliko ubrzane vrtnje lako se potvrđuje pokusom. Puštamo, da utez pokrene kolo i vreteno, pa odredimo, koliko treba vremena za $\sigma = 1$ okret ($= 2\pi$ radijan), a onda ponovivši pokus odredimo vrijeme potrebno za $\sigma = 4$ okreta; potonje je vrijeme 2 puta veće od prvoga.

Kako se akceleracija a tvarne točke određuje iz jednadžbe $m \cdot a = p$, gdje je m masa točke, p sila, tako se kutna akceleracija vrtnje izračunava iz

$$U \cdot \alpha = L,$$

koja veže momenat ustrajnosti U, momenat sile L i kutnu akceleraciju α. Kod te sličnosti odgovara dakle

masi točke	momenat ustrajnosti
akceleraciji	kutna akceleracija
sili	momenat sile.

Jednadžba $U\;\alpha = L$ može se mjerenjima utvrditi, teoretično dade se ona izvesti iz Newtonovih aksioma.

67. Sastavljeno njihalo. Ako se čvrsto tijelo može vrtjeti oko horizonta osi, a težište je tijela izvan te osi, tijelo se zove sastavljeno njihalo. Svaku česticu tijela možemo naime shvatiti kao jednostavno njihalo, koje je manje slobodno negoli njihalo § 40., i sva ta jednostavna njihala izvode slične njihaje. Ako su zamasi maleni, ti su njihaji približno jednostavni titraji. Za vrijeme njihaja t vrijedi onda formula (Huygens)

$$t = \pi \sqrt{\frac{U}{M d g}};$$

ovdje je $\pi = 3{\cdot}14159$ . . , U je momenat ustrajnosti njihala, M masa njihala, d udaljenost težišta od osi, g akceleracija sile teže.

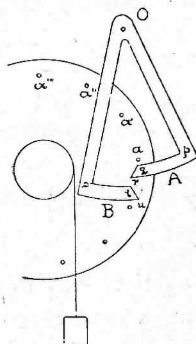
Zad. **50.** Pokažite da je formula za vrijeme njihaja jednostavnoga njihala (§ 40.) sadržana u formuli za sastavljeno njihalo kao specijalan slučaj.

Padanje dimnjaka. Kao sastavljeno njihalo može se shvatiti i štap, koji stoji vertikalno na tlima, pa iz toga namještaja pada (u horizontalni). Kutna akceleracija postaje sve veća i kod izvjesnoga priklona štapa njegov slobodni kraj dobije akceleraciju veću od g. Na taj kraj djeluju dakle sile veće od same težine, t. j. u štapu zavladaju unutarnje napetosti. Kada se poput štapa ruši visok tvornički dimnjak, ne mogu nastati tolike napetosti, kolike bi trebale da dimnjak do kraja pada poput štapa, već se dimnjak u padu prelomi, te mu gornji dijelovi zaostan.u

68. Ura njihalica. Da ura tjerana utezom (isp. § 65.) ide pravilno, dodao joj je Huygens kao „regulator“ njihalo (1656.; zamisao takve ure nalazi se i u Galileja 1641.). Svakomu njihaju odgovara jednak

pomak urinih kolesa, pa kako su njihaji izohroni, i hod je ure pravilan. Među bitne dijelove ure njihalice ide „zapinjač" (franc. échappement), kojemu je svrha, 1.) da kretanje kotača bude zavisno o gibanju njihala, 2.) da na trošak energije uteza njihalu nadomjesti energiju, koju ono trenjem gubi.

Ima raznih vrsta zapinjača; opisat ćemo zapinjač „sa klincima". Na kotaču, što ga tjera utez, nalazi se niz u krug poređanih klinaca a, a', a'' . . . (sl. 59.); oni su jednako razmaknuti. Ispred kotača pomiče se oko osi O komad kovine AOB, koji je čvrsto spojen s njihalom; na lukovima A i B toga omada klinci se redom zaustavljaju. Kad se njihalo njiše s lijeve. strane na desnu, klinac se a skliže na luku pq, kotač miruje Najposlije klinac izgubi podlog, te se na kosini qr spušta, pri čemu se i kotač kreće. Pritisak klinca na kosinu daje njihalu nužni nagon na desno. Malo kasnije klinac se a skliže na luku ts, te kotač opet miruje. Kad se njihalo vraća s desne strane na lijevu, u određeni će se čas klinac a spustiti niz kosinu tu. a iza toga igru ponavlja klinac a' i t. d. — Umjesto uteza može uru njihalicu tjerati i elastično pero.

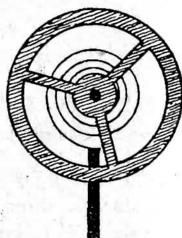


Sl. 59.

I kod džepne ure napeto pero goni kotačiće. Uz to se u njoj nalazi malen kotačić zamašnjak t. zv. treptalo, kojega je os čvrsto spojena s jednim krajem plosnate elastične spirale (sl. 60.), koja je na drugom svom kraju učvršćena. Pod utjecajem napetosti spirale treptalo izvodi izohrone titraje, te nadomješta njihalo ure njihalice. — U obične džepne ure čuje se 5 udaraca u sek.

Bitne su čest i ure prema tome 1.) pogon, 2.) sustav kotača sa kazaljkama i brojištem, 3.) zapinjač i 4.) regulator.

Metronom (Mälzel 1815.) služi za davanje takta u glazbi a i kod fizikalnih pokusa. Razmak njegovih udaraca dade se mijenjati (40—200 udaraca u min). On je zapravo ura bez brojišta; gonjen je elastičnim perom, a reguliran njihalom. Vrijeme se njihaja mijenja tako, da se pomakne utez M, koji se nalazi na štapu njihala iznad osi O (sl. 61.). Iza štapa je ljestvica t. j. zarezi i brojke; brojka kazuje, koliko udaraca daje metronom u 1 min, ako je pomični utez kod te brojke.

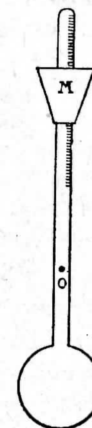


Sl. 60.

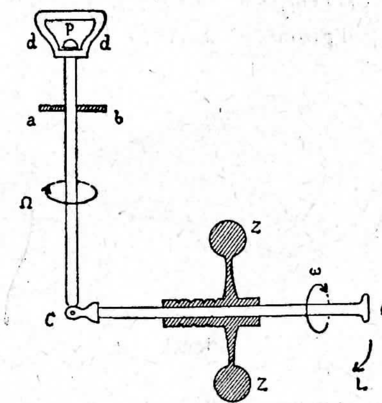
69. Zvrk. Najjednostavniji je zvrk čvrsto tijelo, kojemu je tvar razmještena „rotatorno simetrično" oko geometrijske osi zvrkove; to će reći, ako se zvrk oko svoje osi zakrene, svaku česticu zamijeni čestica jednake mase. Takvi su zvrkovi oni čunovi, što ih djeca gone udarcima biča. Schmidtov je zvrk duž geometrijske osi probušen, a kroz rov mu je provučena čelična

os, koja ne treba sudjelovati kod vrtnje (u sl. 62. co je os zvrka, zz dio, koji se vrti). Upoznat ćemo se s nekim pojavima gibanja zvrka; teorija je njihova zamršena, pa je ne ćemo prikazati.

Jedan kraj osi co Schmidtova zvrka neka je tako zglobom učvršćen na donjem kraju c vertikalnoga štapa pc, da se os zvrka može kretati u vertikalnoj ravnini, dok štap miruje. Štap neka visi na dršku dd tako, da se može kretati oko vertikalnoga pravca. Prema tome može se osi zvrka podati kojigod smjer. Stavi li se zvrk u brzu vrtnju sa kutnom brzinom ω radijan/sek, a os co namjesti horizontalno i onda zvrk pusti, očekujemo u prvi mah, da će težina zvrka os zakrenuti u vertikalnoj ravnini prema dolje. No pokus pokazuje, da os co ostaje horizontalna, a vrti se lagano oko pravca pc. Potonja se vrtnja zove precesija (jer se teorijom zvrka tumači precesija ekvinokcija u astronomiji). Smjer precesije u skladu je sa pravilom „težnje za paralelizmom" (Foucault 1852.): pod utjecajem momenta neke sile os se zvrka zakreće tako, da se vrtnja zvrka nastoji približiti paralelizmu sa vrtnjom, što je želi sila izvesti. Ako se zvrk sl. 62. vrti kao kazaljka ure za nekoga, koji gleda s desne strane, precesija vodit će zvrk naprijed, jer kad bi se tako precesija nastavila do zakreta = pravome kutu, vrtnja bi zvrka postala usporedna sa vrnjom osi, što smo je isprva očekivali poradi sile teže.



Sl. 61.



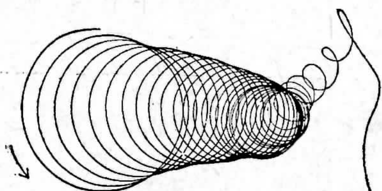
Sl. 62.

Brzina precesijske vrtnje Ω jest to veća, što je veći momenat težine L, a to manja, što je veći momenat ustrajnosti zvrka (uzet s obzirom na geometrijsku os) U i što je veća brzina vrtnje ω. Vrijedi formula $\Omega = \frac{L}{U\omega}$.

Ako precesiju umjetno ubrzamo tako da klinac ab, što je poprijeko na štapu pc učvršćen, rukom uhvatimo i vrtnju štapa pospješimo, os se zvrka diže (u skladu sa težnjom za paralelizmom!). Nešto je slična, kad jednostavan zvrk pleše na stolu, a os mu je priklonjena; trenje, kojim stol djeluje na zvrk, nastoji tako os zvrka zakrenuti, da se ona uspravlja, te postaje vertikalna. — Ako precesiju spriječimo uhvativši čvrsto klinac ab, os zvrka pada.

Na postanak opisane precesije bitno utječe trenje. Kad ne bi bilo trenja, mogla bi gore opisana precesija zvrka sl. 62. samo tako nastati, ako

bi zvrku osim vrtnje oko osi zgodnim udarcem podijelili odmah s početka i precesijsku vrtnju. Nema li toga udarca, opisivat će svaka točka osi neke „poligonalne“ krivulje.

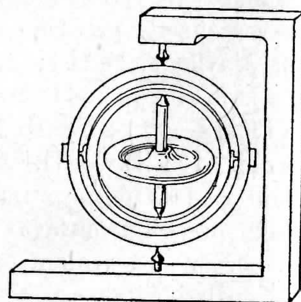


Sl. 63.

Slika 63. prikazuje krivulju, koju je opisao, donji kraj osi jednostavnoga zvrka (kotač od ure) koji je plesao na počađenoj horizontalnoj staklenoj ploči. Da nema trenja i da je ploča savršeno horizontalna, izašla bi kružnica, a težište bi zvrka stajalo na miru.

70. Primjene zvrka. Zakretanje zemaljske osi, koje čini bit precesije ekvinokcija, ima uzrok u djelovanju Mjeseca i Sunca. Zemlja je zvrk, koji u 1 zvjezdanom danu načini 1 okret. Kad bi Zemlja bila homogena kugla, Mjesec bi je htio naprosto privući; no kako je Zemlja splоštena, nije razmještaj sila, kojima Mjesec vuče česti zemaljske, simetričan s obzirom na pravac, što spaja središte Zemlje sa središtem mjesečevim, pa te sile nastoje Zemlju još i zakrenuti. Zemlja se vlada spram tih sila kao zvrk i otuda nastaje precesija. (N e w t o n.) Godišnjemu iznosu precesije 50″ pridonosi Mjesec 34″, a Sunce 16″.

Zvrk predočen slikom 64. namješten je u dva prstena i okviru tako, da mu se os može postaviti u kojigod smjer. Osi, oko kojih se vrte prstenovi, i os zvrka sijeku se u težištu zvrka; radi toga sila teže ne utječe na gibanje zvrka. Vrti li se taj zvrk, može se okvir kakogod zakrenuti, pa da ipak os zvrka u prostoru ostaje s a m a s e b i u s p o r e d n a. Ako je okvir čvrsto spojen sa Zemljom, okvir se sa Zemljom zakreće, pa se os zvrka ostajući sama sebi usporedna pomiče relativno spram okvira. Na tom se osniva dokaz za vrtnju Zemlje (Foucault 1852.).



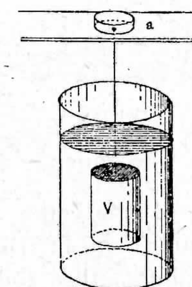
Sl. 64.

Zvrk može služiti kao k o m p a s, t. j. da pokaže smjer sjever-jug. Takav kompas-zvrk pliva na živi, a os mu je, dok zvrk nije u pogonu, horizontalna. Zvrk se goni kao električni motor. Radi vrtnje zemaljske takav se zvrk njiše poput magnetske igle, tek mnogo sporije. Za razliku od magnetskoga kompasa namješta se t o č n o u meridijan, a željezo na lađama mu ne smeta. — Teškim se zvrkom može utišati postrano zibanje lađe (S c h l i c k 1903.); zamah se gibanja u jednom primjeru smanjio od 35° na 1°, kad se zvrk stavio u pogon. — Željeznica sa zgodnim zvrkom mogla bi lebdjeti na jednoj tračnici (B r e n n a n 1907.).

3. Mehanika tekućina

71. Tlak u tekućini. Tjelesa, kojima se oblik vrlo lako mijenja, zovu se t e k u ć i n e. Mehanika tekućina zove se h i d r o m e h a n i k a (grč. ὕδωρ, *voda*); ona se može dijeliti u h i d r o s t a t i k u i h i d r o d i n a m i k u (isp. § 17.), nauku o ravnoteži tekućina i nauku o gibanju njihovu. Tehnička nauka o mehaničkoj primjeni vode zove se h i d r a u l i k a (grč. ὕδραυλις, *vodene orgulje*).

U vodi neka visi valjak V (sl. 65.) na žici ab, koja je produženje osi valjka. Ako gornji kraj žice zakrenemo oko osi žice, žica će se u prvi mah sama u sebi saviti ili „tordirati“, no odmah će se i valjak staviti u kretanje, te će se najposlije valjak primiriti u položaju, u kojem je baš toliko zakrenut prema početnom svom položaju, koliko se zakrenuo kraj a žice. Voda dakle ne može uzdržati ravnotežu elastičnoj sili torzije; pritisak, što ga voda izvodi na miran valjak, nema komponente koja bi mogla kretanje valjka zaustaviti; tekućina dakle p r i t i s k u j e s t i j e n u m i r n o g a t i j e l a s i l a m a, k o j e s u s v a g d j e o k o m i t e n a p o v r š i n u t i j e l a. Tako isto uzimljemo, da se dvije česti mirne tekućine, koje se dotiču, pritiskuju silom, koja je n a m e đ a š n j u p l o h u o k o m i t a.



Sl. 65.

Ako se dvije susjedne česti tekućine, koje luči ploha velika na pr. 3 cm², pritiskuju silom na pr. 6 kg*, djeluje kroz svaki cm² međašnje plohe sila 6 : 3 = 2 kg*, pa velimo, da kroz međašnju plohu djeluje „t l a k“ 2 kg*/cm² („kg* na cm²“). Tlak se izračunava dijeleći silu sa plohom. Jedinice su tlaka na pr. din/cm², pa kg*/cm²; potonja se zove također (t e h n i č k a) a t m o s f e r a, jer tlak uzduha ili atmosfere u običnim prilikama nije mnogo od nje različan (grč. ἀτμός, *para, dah*; σφαῖρα, *kugla*).

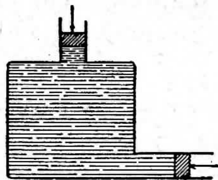
Kroz točku A tekućine u misli položimo kojegod malene plohe: teoretično se može pokazati, da kroz svaku od tih ploha djeluje jednak tlak, ako je tekućina mirna. Skup svih tih jednakih tlakova zove se ukratko „tlak u točki A“. (Razmještaj tlakova u točki č v r s t o g a tijela ili u točki t e k u ć i n e, k o j a s e g i b l j e, uopće je zamršen, te se ne može j e d n i m jedinim brojem predočiti).

Tlak tekućine dolazi otuda, što je pritiskuju tjelesa, koja je omeđuju, a i otuda, što je tekućina teška, pa dublje česti treba da nose teret tekućine, što je nad njima. Ima primjera, gdje je utjecaj težine neznatan; onda vrijedi z a k o n j e d n o l i k o g a š i r e n j a t l a k a: t l a k j e u s v i m a t o č k a m a t e k u ć i n e j e d n a k.

Prema tome ako na tekućinu pritiskuju čepovi jednakoga proreza (sl. 66.), treba da je pritisak svakoga čepa jednak.

Zad. **52.** Koliko je atmosfera a) 1000000 din/cm², b) 1000 tona/m²?

72. Tekućine i plinovi. Pojam tekućine, kako je određen u predašnjem §, ne obuhvata samo tekućine u užem, običnom smislu riječi, nego i plinove. Tekućini u užem smislu pripisujemo još i to svojstvo, da joj se obujam gotovo ništa ne mijenja, kad mijenjamo tlak. Ako vodi s obujmom 1 litra povećamo tlak za 1 atmosferu, obujam se umanji jedva za $\frac{1}{20}$ cm³. Stlačivost je vode samo 5 puta veća od stlačivosti livenoga željeza, koje se čak lakše stlačuje nego li živa. Tekućine, kojima se vrlo lako mijenja obujam, zovu se plinovi ili gazovi (prema „*kaos*").

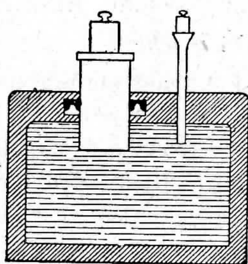


Sl. 66.

Ovdje ćemo pod nazivom „tekućina" razumijevati vazda tekućinu u običnom smislu. Bitna je razlika između tekućine i plina u tome, kako im se mijenja tlak kod rastezanja. Kada obujam plina raste, tlak se približuje vrijednosti 0. Kada obujam zatvorene posude, koja je sasvim puna vode, povećavamo, voda se rasteže, tlak spadne na 0, a onda i ispod te vrijednosti, te postane negativan; u tekućini onda vlada „teg". Kad teg bude prevelik, voda se rastrgne. — I tekućine i plinovi pričinjaju nam se savršeno elastični" (isp. § 30.); ako tlak povećamo, pa onda opet smanjimo na prvobitnu vrijednost, i obujam poprima svoju predašnju vrijednost.

Zad. 53. Tlak vodenih para u parnom kotlu neka bude za 7 ½ atmosfera veći od tlaka uzduha; „sigurnosni ventil" (Papin 1674.) ima prorez 18 cm²; on je učvršćen na „jednokrakoj" horizontalnoj poluzi, 5 cm daleko od osi, a drži mu ravnotežu utez težak 23 kg*. Na koje mjesto poluge treba utez učvrstiti. [29 cm daleko od osi]

73. Hidraulički tijesak. Posuda vrlo čvrstih stijena puna je vode, a zatvaraju je dva pomična valjkovita klipa, jedan s velikim, drugi s malenim prorezom. (Sl. 67.) Da ne bi voda izilazila između stijene i klipa, opasan je klip kožnatom „manšetom". koja je u prstenastoj udubini stijene. Ako je prorez jednoga klipa na br. 100 puta veći od proreza drugoga, bit će sila, kojom voda nastoji izgurati veći klip, 100 puta veća od pritiska, koji bi potisnuo manji klip. Na veći klip treba dakle da izvana djeluje 100 puta veća sila negoli na maleni, da bude ravnoteža. Kako kod poluge tako i ovdje velikoj sili može držati ravnotežu malena. I ovdje vrijedi zakon virtualnih radnja (§ 64.), jer dok se veliki klip pomakne za 1 mm, maleni će se klip pomaći za 100 mm, te su radnje kod oba klipa jednake. (Pascal 1660.). — Praktički se ovo primjenjuje kod hidrauličkoga tijeska (Bramah 1795.). Opisanom spravom ne bismo mogli velike radnje izvesti, jer dok bi se veliki klip samo malko pomaknuo,



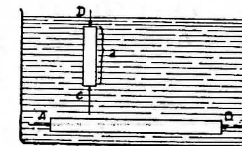
Sl. 67.

gibanje bi malenoga klipa bilo dovršeno. Zato je kod hidrauličkoga tijeska svaki klip u zasebnoj posudi, posude su spojene, a zgodni ventili dopuštaju, da se gibanje malenoga klipa mnogo puta ponovi i voda, koja je potrebna, izvana usisava.

Hidraulički tijesak služi za izvođenje sile, kojom se tlače razne tvari. Vuna pod njegovim tlakom postaje čvrsta poput hrastovine. Tijeskom se dižu tereti i izvode one grdne sile, što trebaju za ispitivanje mehaničkih svojstava tvari; u takovim pokusima došlo se već do tlakova od 100 000 atmosfera.

Zad. 54. Promjer jačega klipa hidrauličkoga tijeska jest 250 mm, tlak vode 400 atmosfera; kolika je sila tijeska? [196 tona*]

74. Tlak i teža. U posudi kojegagod oblika neka je tekućina (Sl. 68.); zamislimo uzak valjak AB tekućine, kojemu je os horizontalna. Koje sile djeluju na taj valjak u smjeru njegove osi? Sile, kojima susjedna tekućina tlači plašt valjka, okomite su na os; to isto vrijedi za težinu valjka. U smjeru osi djeluje dakle samo pritisak susjedne tekućine na jednu i drugu osnovku valjka. Kako je tekućina valjka u ravnoteži, treba da je pritisak na obje osnovke jednak, a kako su osnovke jednako velike, jesu i tlakovi na tim osnovkama jednaki. Razabiramo dakle, da je u dvije točke A i B, koje su u istoj horizontalnoj ravnini, tlak tekućine jednak. Drugim riječima: plohe jednakoga tlaka jesu horizontalne ravnine.



Sl. 68.

U tekućini zamislimo uzak valjak CD tekućine sa vertikalnom osi. Ako je prorez valjka σ cm², tlak na donjoj osnovci u g*/cm², tlak na gornjoj osnovci v g*/cm², bit će pritisak, kojim susjedna tekućina djeluje na valjak odozdo, $u\sigma$ g*, pritisak odozgo $v\sigma$ g*. Ako je specifična težina tekućine s g*/cm³, visina valjka a cm, bit će težina valjka $\sigma a s$ g*. Ta težina i pritisci na dno treba da su u ravnoteži (sile, što djeluju na plašt, nemaju vertikalne komponente), te je

$$u\sigma = v\sigma + \sigma a s$$

ili

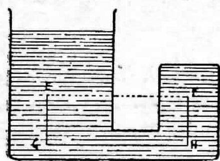
$$u - v = a s.$$

Prema tome, kad se spuštamo u tekućinu, porast je tlaka jednak umnošku dubljine i specifične težine.

Primjer. Specifična je težina vode $s = 1$ kg*/dm³; spustimo li se u vodi za $a = 10$ m $= 100$ dm, tlak će narasti za $100 \times 1 = 100$ kg*/dm² $= 1$ kg*/cm² (atmosfera).

Ako posuda s tekućinom imade zamršeniji oblik (sl. 69.), te dvije

točke E i F iste horizontalne ravnine leže tako, da se ne mogu jedna s drugom spojiti crtom, koja bi bila sva u tekućini i u horizontalnoj ravnini, opet su tlakovi u točkama E i F jednaki. To se razabira, ako spojimo točke E i F slomljenom crtom $EGHF$, koja je sva u tekućini, a sastoji od komada vertikalnih i horizontalnih pravaca; treba slijediti mijenjanje tlaka na toj crti.



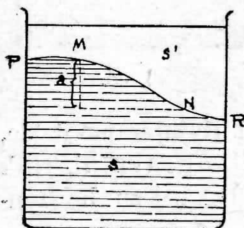
Sl. 69.

Zbog toga specifična je težina morske vode u dubljini veća; gdje je more 3500 m duboko, površina je za kojih 27 m niža nego što bi bila, da se voda ne da stlačiti.

Porast tlaka sprečava čovjeku spuštanje u morske dubljine. U dubljini 923 m, do koje se spustio *Beebe* (g. 1934., u čeličnoj kugli!), tlak je blizu 100 atmosfera.

Zad. **55.** Ako je specifična težina žive 13·5 g*/cm³, kolikom porastu dubljine pripada porast tlaka = 1 atmosfera? [74·1 cm]

75. Površina tekućine. Površina, u kojoj se tekućina tiče uzduha ili druge koje tekućine, jest horizontalna ravnina; ona je dakle okomita na smjeru sile teže. Kad bi ta površina bila priklonjena (*PR*, sl. 70.), mogli bismo na njoj odabrati dvije točke M i N, kojih je jedna za a dublja negoli druga. Jedna tekućina neka ima specifičnu težinu s, druga s'. Budući da točke M i N pripadaju prvoj tekućini, to je prema preď. § razlika tlakova u tim točkama as; budući da pripadaju drugoj tekućini, spomenuta je razlika tlakova as'. Izašlo bi dakle $a s = a s'$, što ne može biti, ako tekućine imadu različite specifične težine.



Sl. 70.

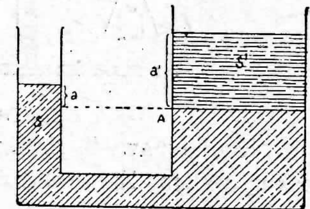
Rjeđa se tekućina namješta iznad gušće. Dade se doduše zamisliti i obrnuta ravnoteža tekućina, no ona bi bila labilna. Približujemo se donekle potonjem primjeru, ako čašu punu vode zatvorimo tako, da dlanom pritisnemo komad papira, čašu okrenemo i ruku uklonimo; voda ostaje sada iznad uzduha te ih samo papir luči. (Taj pokus ujedno pokazuje tlak uzduha).

Svojstvo, da se laglja tekućina namješta iznad teže, primjenjuje se kod libele (Thévenot 1661.), koja pokazuje, je li neka ravnina horizontalna; pogreška pri tom ne treba premašiti nekoliko ″. U libele je horizontalna cijev, kojoj je sredina vrlo slabo prema gore zakrivljena, a sadrži vodu ili alkohol i mjehurić zraka. Ako taj mjehurić stoji u sredini cijevi, ravnina, na kojoj leži libela, jest horizontalna. — Sa nazivom libela (*vagica*, prema lat. *libra, vaga*) podudaraju se engl. *level* i franc. *niveau* (čit. nivo), što nam znači jednu istu horizontalnu ravninu.

76. Spojene posude. 1. Ako su dvije otvorene posude spojene cijevlju, a tekućina jedne i druge posude u neprekidnoj je svezi, tekućina stoji u obje posude do jednake visine. To se obrazlaže onako kao i tvrdnja preďašnjeg §.

Primjena. Vodokaz parnoga kotla jest vertikalna staklena cijev, koja je na gornjem i na donjem kraju spojena s parnim kotlom, te pokazuje visinu vode u kotlu (Kad bi bilo premalo vode u kotlu, dijelovi bi se kotla tako ugrijali, da bi mogla nastati eksplozija. Isp. § 129.) — Ako se na dva mjesta postave posude s vodom i te posude spoje kaučukovom cijevi, može se odrediti, koje su točke tih mjesta na jednakom nivou.

2. U dvije spojene posude nalijmo neke tekućine na pr. žive; iznad površine tekućine u jednoj posudi nalijmo još koju rjeđu tekućinu, koja se s onom prvom „ne miješa", na pr. vode. Opazit ćemo, da rjeđa tekućina stoji više negoli gušća. Ako površina tekućine, kojoj je specifična težina s, stoji a cm iznad ravnine doticanja AA (sl. 71.), tlak je u toj ravnini za $a s$ veći nego li na površini; druga tekućina neka ima specif. težinu s', a površina neka joj je a' cm iznad AA; onda je tlak u ravnini AA za $a' s'$ veći nego li na površini druge tekućine. Kako na površinama vlada jednak tlak (tlak uzduha), treba da je

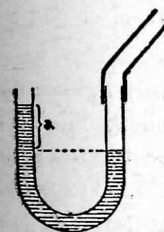


Sl. 71.

$$a s = a' s' \quad \text{ili} \quad a : a' = s' : s.$$

Visine tekućina nad ravninom doticanja obrnuto su razmjerne specifičnim težinama. — Mjereći visine a i a' možemo odrediti omjer specifičnih težina (hidrometar).

3. „Otvoreni manometar" jest manometar (sprava za mjerenje tlaka plina; grč. μανός, *rijedak*) u obliku U-cijevi (Sl. 72.), kojoj je jedan krak otvoren, drugi spojen s plinskim spremištem. U cijevi je voda ili druga tekućina. Ako je razlika visina tekućine a cm, specifična težina s g*/cm³, tlak je plina za as g*/cm² veći od tlaka uzduha.

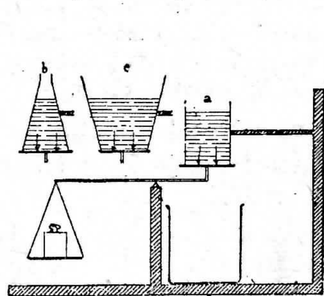


Sl. 72.

Štogod je dosele rečeno o utjecaju teže na tlak, vrijedi, koliko se može uzeti, da je smjer sile teže svagdje isti. Hidrostatika môra ponešto je zamršenija; poimence je ploha nivoa svagdje okomita na smjeru teže; u homogenoj tekućoj kugli velikoj kao Zemlja tlak ne bi rastao razmjerno sa dubljinom, već sporije, jer akceleracija teže opada prema središtu zemaljskom; da je Zemlja sva od vode gustoće 1, bio bi tlak u središtu 320000 atmosfera.

77. Pritisak na stijene. Ako je dno posude dio horizontalne ravnine sa površinom σ cm², visina tekućine a cm, specifična težina s g*/cm³, pritiskivat će dno sila $\sigma a s$ g*; pri tome je svejedno, koji oblik ima posuda iznad svoga dna, jeli ona uspravna ili se prema gore suzuje (malo vode!) ili širi (mnogo vode!). Taj „hidrostatski paradokson" može se pokusom pokazati uz pomoć osobite vage (sl. 73.; Stevin 1585.); na kraju

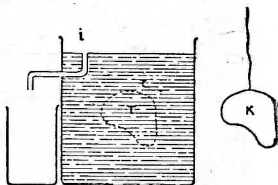
poluge učvršćeno je dno posude, dok stijene (*a* ili *b* ili *c*) drži poseban stalak.



Sl. 73. Sl. 74.

Kod ustava ili dolinskih pregrada zadržava vodu nasip ili zid visok makar 100 m. Zid treba da je dosta jak, da izdrži veliki pritisak vode.

Pritisak vode prema gore lijepo se razabira, kad puštamo, da voda drži otežu ploču pritisnutu uz široku staklenu cijev (sl. 74., Stevin).



Sl. 75.

78. Arhimedov zakon o gubitku težine. Kad tijelo *K* uronimo u tekućinu (sl. 75.), istisne se dio tekućine *T*; kako je dio *T* prije toga u tekućini mirovao, držali su tlakovi okolišne tekućine ravnotežu težini tekućine *T*: zbog tlakova tekućina je *T* izgubila bila prividno svu svoju težinu. Kad tekućinu *T* zamijeni tijelo *K*, tlakovi se ne promijene, dakle tijelo *K* prividno izgubi toliko težine, koliko je prije izgubila tekućina *T*, t. j. toliko koliko važe tekućina *T*. Tijelo uronjeno u tekućinu prividno gubi toliko težine, koliko važe istisnuta tekućina. (Arhimed.)

Pokus. Kod „hidrostatske vage“ jedna je zdjelica na kratko obješena, da se može tijelo, s kojim eksperimentiramo, objesiti na zdjelicu. Tijelo se odvagne, dok visi u uzduhu, a onda se podmetne voda, te se tijelo vagne u vodi; odbidbom dobiva se gubitak težine uronjenoga tijela. Težina se istisnute vode nađe ovako: na početku neka seže voda do izlijeva *i*; kad tijelo uronimo, sva istisnuta voda iscuri u drugu posudu, pa se može odvagnuti.

Ako tijelo u tekućini izgubi više težine, nego što je samo teško, moramo upotrebiti silu, da tijelo ne izroni. Sila, što tijelo tjera iz tekućine prema gore, zove se uzgon.

Određivanje specifične težine. Ako komad željeza važe u uzduhu *P* g*. a u petroleju *Q* g*, gubitak je težine u petroleju *P-Q* g*, pa je to i težina petroleja, koji ima jednak obujam kao i željezo. Prema tome omjer *P*: (*P-Q*) kaže, koliko puta važe željezo više negoli jednak obujam petroleja, dakle i to, koliko je puta specifična težina željeza veća od specifične težine

petroleja. Kad bi petrolej zamijenili vodom, dobili bismo specifičnu težinu željeza, jer je specifična težina vode ≐ 1 g*/cm^3.

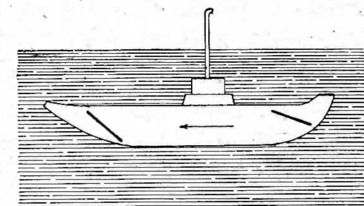
Ako za neko čvrsto tijelo odredimo, koliko izgubi težine u jednoj tekućini, koliko u drugoj, upoznali smo težine jednakih obujmova tih tekućina, dakle i omjer njihovih specifičnih težina.

Zad. **56.** Težina je zlatnoga novca u uzduhu 6·76 g*, u vodi 6·37 g*; kolika je spec. težina? [17·3]

Zad. **57.** Tijelo važe u uzduhu 225·8 g*, u vodi 181·5 g*; u razređenoj sumpornoj kiselini 174·9 g*; kolika je specifična težina kiseline? [1·15 g*/cm^3]

79. Arhimedov zakon plivanja. Tijelo, koje pliva, izgubilo je svu težinu; u drugu ruku ono je izgubilo toliko težine, koliko važe istisnuta tekućina; dakle tijelo pliva, kad istisnuta tekućina važe toliko koliko i tijelo samo. (Arhimed).

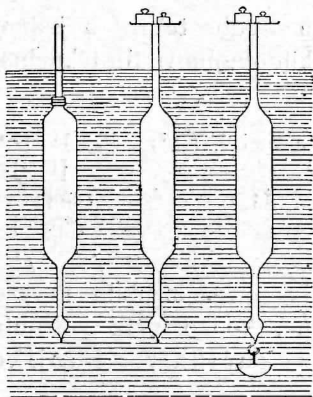
Slana je voda gušća od čiste vode; zato jaje u slanoj vodi pliva, dok u čistoj vodi tone (Galen, Γαληνός, 2. vijek). Ako se na slanu vodu oprezno nalije sloj čiste vode, jaje na granici lebdi (Galilei). — Kad podmornica ima roniti, uzimlje u svoju ljusku „balasta“, i to vode, da bude teža. Da podmornica izroni, istjera se balastna voda stisnutim zrakom. Povrh toga se ravnoteža podržaje „dinamički“, t. j. u vožnji, poradi djelovanja zgodno namještenih „horizontalnih“ kormila (sl. 76).



Sl. 76.

Areometri su sprave, koje plivajući pokazuju specifičnu težinu tekućine (grč. ἀραιός, *rijedak*). Kod areometra sa ljestvicom mjeri se specifična težina po dubljini, do koje je uronio. Areometar imade otprilike oblik uskoga, šupljega valjka, koji je na jednoj strani opterećen, da pliva u vertikalnom namještaju. Alkoholometar jest areometar, kojega ljestvica neposredno pokazuje % alkohola u žesti; što je više alkohola, to je žesta rjeđa, pa areometar dublje roni. (Areometar nalazimo opisan već u 4. vijeku, te je služio, da se tobože odredi dobrota vode.) Areometar s utezima toliko se opterećuje, da u svakom primjeru jednako duboko uroni u tekućinu. Ako areometru teškom na pr. 60 g* treba u vodi dodati 25 g*, a u žesti 18 g*, da uroni do propisanoga znaka, istisnuta voda važe 85 g*, istisnuta žesta 78 g*; dakle je specifična težina žeste 78 : 85 = 0·92. Kod prvih tih sprava (de Roberval 1644.) utezi — u obliku prstena — bijahu u tekućini (sl. 77. a); da se ukloni pogreška, koja nastaje time, što utezi u tekućini postaju laglji, namjestili su kasnije na areometar zdjelicu

za uteze i to iznad spomenutoga znaka (sl. b, Fahrenheit g. 1724.). S areometrom, koji ima na donjem kraju zdjelicu (sl. c, Nicholson g. 1787.), mogu se određivati specifične težine i čvrstim tjelesima (kako?).



a) b) c)

Sl. 77.

Zad. **58.** Koliko m^3 slatke vode, a koliko morske vode istisne lađa teška 10000 tona, ako je specifična težina slatke vode 1, a morske vode 1·026?

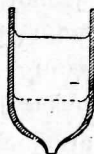
Za **59.** Koliko je puta veći obujam dijela ledene sante, što je pod vodom, od obujma dijela, što je nad vodom? specifična je težina leda 0·91, vode 1·03. [7·6 puta.]

80. Napetost površine. Površina se tekućine vlada kao kakva napeta kožica. Pospe li se površina vode t. zv. crvotočinom (likopodijem), pa se nad vodu izlije iz bočice nešto para eterovih, oko onog se mjesta, na koje su pare pale, crvotočina u tren raziđe; izgleda da je površina čiste vode jače napeta, negoli površina vode smiješane s eterom, pa se zbog te razlike površina rastegne. — Bace li se na čistu vodu mrvice kamfora, izvodit će one pravo vrzino kolo; voda oko mrvice ne prima otapanjem svagdje jednako mnogo kamfora, pa je zato njezina napetost različita. — Šivaća igla može horizontalno plivati na čistoj vodi, ma da je od vode 8 puta specifički teža (Norman, 16. vijek); voda, gdje nosi iglu, udubljena je, kako pokazuje sl. 78, gdje krug znači prorez igle.



Sl. 78.

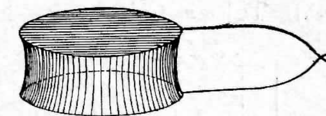
Napetost je površine čiste vode razmjerno velika, dok na primjer sapunica ne može nositi igle; neznatna kapljica terpentinova ulja sasvim pokrije široku površinu vode, pa osujeti pokus sa kamforom. U vertikalnoj cjevčici, dolje veoma suženoj (sl. 79., Dvořák 1899.) mogla se naliti čista voda 22 mm visoko a da nije iscurila; drži je kožica površine na donjem otvoru; alkohol nije se mogao tako visoko uzdržati, premda je rjeđi; i voda gotovo sasvim iscuri, ako se približe eterove pare.



Sl. 79.

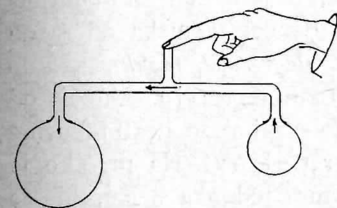
Napetost površine tekućine ne može se u svemu isporediti s napetošću elastične, na pr. kaučukove kožice, jer dok rastezanjem napetost kaučukove kožice postaje veća, napetost je površine vode jednaka, kolikogod se površina povećala. (Osim toga je napetost površine toliko jednostavnija od napetosti elastične kožice, koliko je hidrostatski tlak u nekoj točki jednostavniji od tlaka u čvrstom tijelu.)

Ako iole pravilan okvir od žice gurnemo u sapunicu i izvadimo, izlaze lijepi likovi od tekuće kožice (sl. 80., Plateau 1862.); kožica poprima oblik ravnih ili krivih ploha, koje imadu manju površinu, nego ikoja druga ploha istih međa.



Sl. 80.

Mjehur od sapunice imade dvije površine, unutarnju i izvanju; napetosti tih površina stežu mjehur, te je uzduh u mjehuru pod većim tlakom nego li uzduh izvanji. To je sličan snošaj kao kod parnoga kotla između napetosti stijena i tlaka vodenih para, pa se može teoretski pokazati, da je tlak u mjehuru to veći, što je polumjer manji. To potvrđuje i pokus sl. 81., gdje uzduh ide iz manjega mjehura u veći, jer je tamo tlak manji; manji se mjehur pri tom još više smanji i iščezne.

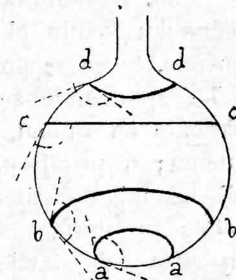


Sl. 81.

Obujam mjehura od sapunice može premašiti 1 hektolitar (Boys 1912.).

Zad. **60.** Ako se na površinu vode veliku 7 dm^2 stavi 0·2 mm^3 terpentinova ulja, ulje se rasprostre iznad cijele površine, te se gore opisani pokus sa kamforom ne da izvesti; koliko je sloj ulja debeo? [0·003 mikron]

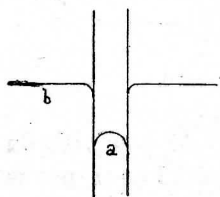
81. Okrajni kut. Površina tekućine uz stijenu nije horizontalna; ona čini sa stijenom kut, koji je stalan, dok god stijena i tekućina ostanu iste vrsti (Young 1804.); na pr. površina žive čini sa površinom neke vrsti stakla kut 143^0 (mjereno u živi!). Kolik je taj kut, stoji do molekularnih sila: do kohezije tekućine i do adhezije tekućine i stijene; kohezijom zovemo sile među bližnjim česticama istoga tijela, adhezijom sile među bližnjim česticama dvaju tijela, koja se tiču. (Lat. *adhaereo, držim se nečega; cohaereo, spojen sam s nečim.*) Površina je okomita na rezultanti sila, što djeluju na česticu površine; prevlada li kohezija, tekućina je uz stijenu snižena (živa u staklu); kraj jake adhezije tekućina se penje uz stijenu (voda u staklu). Na veličinu okrajnoga kuta ne utječe, koliko je stijena debela; razlog je tome taj, što molekularne sile ne djeluju ni na kakvu znatniju udaljenost. Okrajni kut ne stoji ni do toga, kako je stijena priklonjena spram vertikale; sila je teže sasvim neznatna spram molekularnih sila. Stalnost se okrajnoga kuta lijepo vidi, kad se kuglovita posuda postepeno puni živom (sl. 82.); površina je žive ovdje ili izbočena (*a, b*) ili ravna (*c*) ili udubljena (*d*).



Sl. 82.

Ako je površina tekućine uz areometar uzdignuta, ona svojom napetošću ponešto povlači areometar u sebe, pa on pliva nešto dublje negoli odgovara Arhimedovu zakonu.

82. Kapilarnost. Ako je tekućina u cijevi, koja je dosta uska, oblost površine seže od stijene do sredine cijevi; u takvoj je cijevi visina tekućine druga, negoli u širokoj posudi, koja je sa cijevi spojena (Leon. da Vinci 1490.). Taj se pojav zove kapilarnost, a uske cijevi kapilare (lat. *capillus*, *vlas*). Površina se tekućine u kapilari zove meniskus (grč. μηνίσκος, *mjesečić*). Ako je meniskus konveksan, nalazi se nisko. Tumačenje: u točki *a* (sl 83.) odmah ispod meniska tlak je veći negoli u uzduhu, kako je i u mjehuru od sapunice tlak veći; u točki *b* tik ispod ravne površine tlak je kolik i u uzduhu; kako je tlak u *a* veći negoli u *b*, treba da je *a* ispod *b*. Slično razabiramo, da je konkavan meniskus iznad ravne površine. Udaljenost meniska od ravne površine zove se kapilarna depresija (lat. *depressus*, *nizak*), ako je meniskus ispod ravne površine; inače kapilarna elevacija. Ako se od iste tvari načine cijevi različite širine, depresija (elevacija) je neke tekućine u tim cijevima obrnuto razmjerna promjeru cijevi. Na pr. ako je elevacija vode u staklenoj cijevi s promjerom 1 mm jednaka 3 cm, bit će elevacija u cijevi s promjerom 2 mm, $\frac{1}{2}$ mm . . . jednaka 1·5 cm, 6 , . . (Fabry 1650.)



Sl. 83.

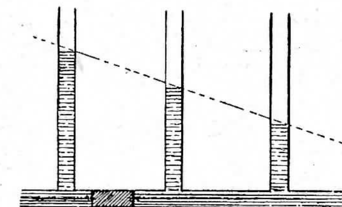
Bugačica siše poradi kapilarnosti. Gdje tlo imade dosta nježne pore, a voda je temeljnica blizu površine zemlje, tlo je vlažno i u doba suše. — Cijev manometra treba da je svagdje jednako široka, da ne bi zbog same kapilarnosti nastala razlika visine. (Napetost površine ispitaše molekularnom teorijom Laplace 1806. i Gauss 1830.)

Zad. **61.** Uz ravnu vertikalnu stijenu visi u staklenoj posudi sasvim blizu i paralelno staklena ploča; zašto privlači stijena ploču, ako se u posudu nalije vode da seže iznad donjega ruba ploče?

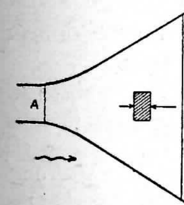
83. Hidrodinamski tlak. Ako se valjkovita posuda s vodom stavi u jednoliku vrtnju oko osi valjka, naskoro će voda sasvim pratiti gibanje posude, te će se posuda s vodom vrtjeti kao jedno jedino čvrsto tijelo. U § 71. spomenulo se, da tekućina djeluje na mirnu stijenu silom, koja je okomita na stijenu, a isto vrijedi za protusilu, kojom stijena djeluje na tekućinu; u primjeru, što ga sada zamišljamo, pritisak stijene na tekućinu nije okomit na stijenu, jer inače stijena ne bi vode pokrenula, već bi voda ostala na miru, ma da se posuda vrti. Kako se oni dijelovi tekućine, što su bliže osi, stavljaju u vrtnju tekućinom, što je bliže stijenama, treba zaključiti, da ni čestice tekućine ne pritiskuju jedna drugu silom okomitom na međašnju plohu, već kosom. Hidrodinamski se dakle tlak ili tlak tekućine, koja se giblje, vlada po zamršenijim zakonima negoli hidrostatski tlak. Kažemo, da je tlak tekućine kod gibanja zato kos prema stijeni, jer se tekućina uza stijenu tare; tako isto „taru se" i čest tekućine jedna o

drugu, pa se taj pojav zove unutarnje trenje tekućine ili viskoznost (lat. *viscum*, *ptičji lijepak*). — Viskoznost je glicerina veća negoli viskoznost vode.

Ako voda teče kroz horizontalnu cijev stalna proreza strujom stalne jakosti, tlak se u smjeru struje umanjuje. Pokazuje se to tako, da se na nekima mjestima cijevi pripoje vertikalne cijevi; visina do koje se voda digne u vertikalnoj cijevi, pokazuje tlak u horizontalnoj cijevi (sl. 84.). Padanje tlaka može se ovako razumjeti. Česticu tekućine, koja ide s lijeva na desno, nastoje zadržati sile trenja; budući da se ipak čestica giblje jednoliko, mora da na nju djeluju još sile, koje drže ravnotežu silama trenja (zakon ustrajnosti!); susjedna tekućina treba dakle da česticu jače pritiskuje s lijeve strane nego li s desne, t. j. što dalje je tekućina došla, to je manji u njoj tlak.

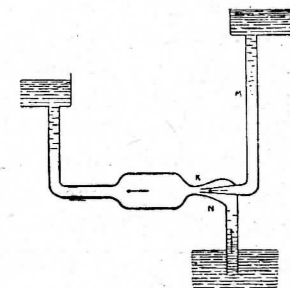

Sl. 84.

Zamislimo umjesto cijevi šupljine tla. Nivo vode temeljnice pada u smjeru strujanja. Na pr. ako se iz zdenca crpe voda stalnom brzinom, nivo je temeljnice to viši, što smo dalje od zdenca. — Nivo temeljnice redovno prema rijekama opada, te ona pritječe rijeci.



Sl. 85.

Svaka je tekućina viskozna, ali imade primjera gibanja, gdje se jedva treba obazirati na trenje. Ako tekućina teče kroz cijev, koja se suzuje ili širi, sama je promjena proreza razlog mijenjanju tlaka. Ako se tok vode širi, u širokom je prorezu *B* (sl. 85.) brzina manja nego li u uskom prorezu *A* (zašto?), dakle brzina se čestica umanjuje. Ako je trenje neznatno, ne može se to zadržavanje drukčije razumjeti već tako, da u smjeru struje tlak raste, pa je tlak, što sprijeda česticu ustavlja, veći od tlaka, koji je straga potiskuje. Gdje je brzina malena, tlak je velik.

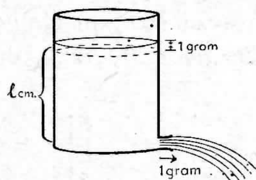


Sl. 86.

Ako se struja tekućine širi, pa dolazi pod tlak uzduha, može dakle ispred toga na uskom mjestu tlak biti manji od tlaka uzduha, te je onda razlika tlaka na tom mjestu i tlaka uzduha negativna (radi kratkoće se često onda kaže, da je tlak negativan). — Kod injektora prikazana u sl. 86. voda dolazi iz visokoga spremišta kroz cijev *M*, pa se struja vode izašavši kroz otvor *K* širi u cijevi *N*, koja je spojena s vodom niskoga nivoa; na uskom je mjestu struje tlak toliko manji od tlaka uzduha, da uzduh tjera vodu odozdo kroz cijev *N*, te se ona priključuje vodi, što je došla odozdo. Stariji je injektor kod parostroja (Giffard 1858.);

ovdje struja vodenih para šireći se poteže sa sobom struju svježe vode i štrca je u parni kotao.

84. Istjecanje tekućina. Ako posuda s tekućinom imade u stijeni l cm ispod nivoa tekućine otvor, tlak tjera tekućinu kroz otvor napolje. Kolika je brzina istjecanja, naći ćemo oslanjajući se na zakon energije. Kinetička energija, što je ima tekućina na otvoru, nastaje na trošak potencijalne energije tekućine u posudi. Kad iscuri 1 g, potencijalna se energija samo u tom promijenila, što je sada nestao 1 g na površini tekućine i njegova potencijalna energija. Kinetička energija mase 1 g na otvoru jednaka je dakle energiji 1 g u visini l cm iznad otvora. Prilike su slične kao kod prostoga pada, gdje također kinetička energija nastaje na trošak potencijalne. Izlazi dakle, da je brzina istjecanja tolika, kolika bi bila, da je tekućina od površine do otvora prosto padala.



Sl. 87.

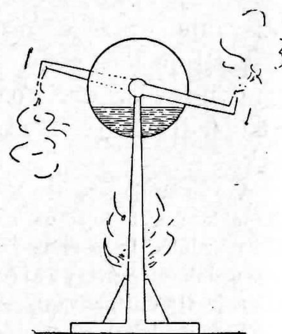
To vrijedi bez obzira na gustoću tekućine; živa i voda jednako brzo istječu, ako su otvori jednako duboko ispod nivoa površine. — Svejedno je i to, kako je otvor namješten, navraća li tekućinu prema dolje ili na stranu ili gore. Ako tekućina iz otvora skače vertikalno u vis, mlaz će doseći nivo, na kojem je površina tekućine u posudi. (Torricelli 1644.)

Kod primjene zakona energije nijesmo se ovdje obazreli na trenje; trenjem nastaje toplina, pa se jedan dio potencijalne energije na to potroši. Gornje tvrdnje vrijede to više, što je tekućina manje viskozna.

Zad. 62. Kojom brzinom curi tekućina na otvor, ako je površina tekućine a) 2 dm, b) 8 dm iznad otvora? [a) 19·8 dm/sek, b) 39·6 dm/sek]

85. Reakcija tekućina. Ako iz otvora u stijeni posude istječe voda, tlakovi vode nastoje posudu pomicati u protivnom smjeru, pa će to gibanje doista i nastati, ako je posuda pomična. Ta „reakcija" (= protusila) tekućine nalići pojavu reakcije kod topa; tamo plinovi eksplozije tjeraju tane u jednom smjeru, a top u drugom (§ 28.), ovdje pak tlakovi vode tjeraju protivnim smjerovima vodu, što istječe, i posudu.

Može se načiniti stroj, koji se vrti reakcijom vode. Stariji je uzor ovome stroju Heronovo „reakciono kolo" (sl. 88.); tjera ga reakcija vodenih para, pa je ono u neku ruku najstariji parostroj. (Ἥρων živio valjda u 1. vijeku poslije Kr.). Heronovo je kolo šuplja kugla, koja se može vrtjeti, a sadržaje vode; kuglu grijemo, te voda vri, a pare joj izlaze kroz zgodno savinute cijevi.


Sl. 88.

86. Hidraulički strojevi. Hidraulički strojevi ili hidraulički

motori (lat. *motor, koji giblje*) vrše na trošak energije vode korisnu radnju. Voda ih tjera udarcem ili težinom ili tlakom.

1. Vodenica podljevnjača ili lopatara ima kolo, koje se vrti oko horizontalne osi, a tjera ga voda, koja udara u lopatice ili pera, što su na obodu kola: os je iznad vode, te voda zgađa ona pera, koja su došla ispod osi. Srazom vode sa lopaticama znatan se dio energije vode potrati, jer se stvara toplina (sraz neelastičnih tjelesa!); voda ostavlja vodenicu brzinom, što je imadu pera, dakle se nije sva kinetička energija potrošila. Odatle se razabira, da je kod te vodenice „stupanj djelovanja" ili omjer korisne radnje spram energije vodom dovedene neznatan.

Podljevnjače bile su poznate već prije Krista, a mogu se primijeniti, gdje je malen pad vode, a vode imade na pretek.

Na podljevnjače podsjećaju kotači, koji gone brodove. Spominju ih već početkom novoga vijeka, a Fulton (1807.) je udesio, da te kotače vrti parostroj.

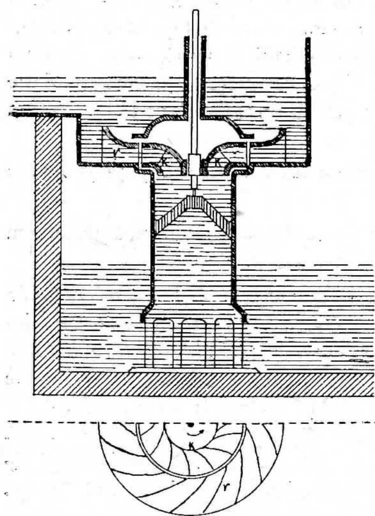
2. Vodenica naljevnjača ili potočara ima na obodu kola ćelije, u koje voda unilazi odozgo, te je ona strana kola, na kojoj su pune ćelije, teža od strane s praznim ćelijama, pa se time vrtnja podržava. Za pogon te vodenice treba dakle voda višega nivoa („gornja voda") i voda nižega nivoa („donja voda"), a s razmakom nivoa treba da je u skladu promjer kola. Ne treba tome baš prirodni (vertikalni) vodopad; dostatno je, da je pad vode tolik, da se može umjetno tok vode najaziti navrh kola. Za naljevnjače se u 18. vijeku upoznalo, da rade bolje od podljevnjača; stupanj djelovanja znade doseći vrijednost $^4/_5$. No ni te se vodenice ne mogu upotrebiti kod velikih pogona. Kad pad vode premaši na pr. desetak metara, nije više zgodno graditi vodenice tako velikog promjera.

Zad. 63. Razmak nivoa kod vodenice naljevnjače neka je 6 m, a množina vode 100 litara/sek; koliku snagu daje vodenica, ako je stupanj djelovanja $^3/_4$? [6 KS]

3. U vodenicama voda se giblje brzinom kojom i obod kola, u turbinama ili čigrama (lat. *turbo, vrtlog*) voda ima drugu brzinu negoli kolo, na koje djeluje; ona se uz pera sklže i pri tom na njih tlači. Da se dobije velik tlak, turbina je namještena u blizini iznad donje vode, a iz gornjega nivoa pridolazi voda bilo prostranim vertikalnim ponorom (kod manjih razlika nivoa) bilo širokom cijevi (kod većih razlika nivoa). Kinetička je energija, što je voda ima dolazeći na turbinu, vazda malena prema potencijalnoj energiji, što je ima zbog velikog tlaka. Svaka turbina imade dio, koji miruje, a zove se vodilja ili stator, i dio, koji se vrti, a zove se kretaljka ili rotor (lat. *roto, vrtim se*). Voda najprije ulazi u vodilju; u njoj dobiva voda brzinu, te zgodnim smjerom ide u kretaljku, tako da je bez udarca podržava u vrtnji. (Da hidrauličkim motorima treba dodati vodilju, dosjetio se Euler 1754.)

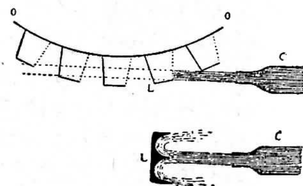
Kod Francisove turbine (Francis 1849.) kretaljka je unutar vodilje. (Sl. 89. pokazuje tlocrt i nacrt.) Voda ide kroz vodilju V prema osi, dok u kretaljci K smjer gibanja postaje paralelan sa osi. Vodilja je zapravo vijenac ćelija, koji nema ni na izvanjem ni na unutarnjem obodu naplataka, te je svaka ćelija omeđena samo sa 4 plohe; slično vrijedi za kretaljku, koja imade toliko ćelija koliko i vodilja. Pera, što luče susjedne ćelije kretaljke, treba da se svojim namještajem tako prilagode brzini vrtnje

i brzini i smjeru gibanja vode, da relativna brzina vode na ulazu u kretaljku bude tangencijalna na pero. Iz kretaljke treba da voda izađe sa što manjom brzinom, tek tolikom, da se voda iz kretaljke izbaci.


Sl. 89.

Peltonova turbina (Pelton god. 1882.) ili žličara ima kretaljku, koja na obodu nosi lopatice osobita oblika; lopaticu čine dvije udubljene „žlice“, što se tiču u jednom bridu, koji je sredina lopatice. Sl. 90. prikazuje dio OO oboda i prorez kroz lopaticu L, koji je okomit na polumjeru kola). Vodilja nije kolo već puka čunjasta cijev C, na koju kroz otvor izlazi mlaz vode. Smjer je toga mlaza tangencijalan na obod kretaljke, tako da pogađa sredinu lopatice; tu se razdvaja u dvije grane; svaki dio struje pritiskuje na lopaticu i postepeno i bez udarca mijenja svoj smjer; najposlije voda izlazi iz žlice gotovo bez brzine. Kod te se turbine potencijalna energija vode u vodilji gotovo sasvim preobrazila u kinetičku, pa je tlak u mlazu jednak tlaku atmosfere; kažemo, da ta turbina djeluje „akcijom“, dok Francisova, kod koje voda ulazi u kretaljku s brzinom i tlakom, djeluje „akcijom i reakcijom“.

Djelovanje Peltonove turbine donekle se može ispo-rediti odbijanju malene elastične kugle od vrlo velike. Brzina je male kugle poslije sraza = 0, ako je prije bila 2 puta tolika, koliko brzina velika kugle. (§ 30.). Tako i kod Peltonove turbine treba da je brzina oboda od prilike $^1/_2$ brzine mlaza.



Sl. 90.

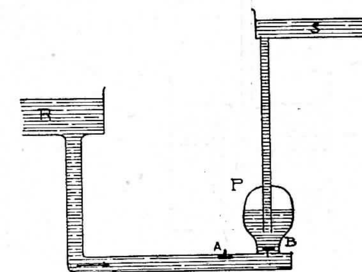
Os je Peltonove turbine obično horizontalna, dok se os Francisove turbine namješta bilo horizontalno bilo vertikalno. — S obzirom na smjer gibanja vode Francisova je turbina „radijalno-aksijalna“;kod „aksijalnih“ turbina voda u glavnome ide smjerom osi (lat. *axis, os*). Francisova je turbina „izvana gonjena“, jer vodilja obuhvata kretaljku; ima radijalnih turbina, koje su „iznutra gonjene“. Kod Francisove turbine voda ulazi na cijelom obodu u kretaljku; ona je „potpuno gonjena“, a vodilja je potpuno kolo. Ima turbina, koje su samo „djelomično gonjene“; kod njih se vodilja proteže samo duž jednoga dijela oboda kretaljke; skrajnji je slučaj djelomično gonjene turbine turbina sa mlazom.

Kaplan izumio je turbinu (1913. i dalje), koja se odlikuje osobitom brzinom. Kretaljka imade samo 2 do 4 pera (krila), te podsjeća na brodski vijak. Voda kroz tu „prozirnu“ kretaljku teče sasvim aksijalno. Premještanjem krila dade se udesiti, da kod svakog opterećenja bude stupanj djelovanja 'otprilike jednak.

Najvažnija je primjena turbina, da vrte generatore električne struje. — U Hrvatskoj su „hidroelektrične“ središnjice: na rijeci Cetini (Gubavica, 96000 KS) i na Krki (Manojlovac, 24000 KS; Skradin, 7000 KS) u Dalmaciji; u izgradnji je Vinodol sa 108000 KS.

Vodomjer (Wil. Siemens 1853.) malena je potpuno gonjena turbina, s kojom je spojena sprava za brojenje okreta; ta turbina ne vrši radnje. — Centrifugalna je sisaljka obrat radijalne turbine izvana gonjene; umjesto da se tlakom vode izvodi kretanje, kretanjem se protivnoga smjera voda goni natrag i diže u vis. — Vjetrenjača podsjeća na aksijalnu turbinu (bez vodilje!); imade 4 ili mnogo krila; poznavahu je Arapi već u 7. vijeku. Amo ide i Woltmannova sprava (1790.) za određivanje brzine vode tekućice, sa 3 ili 4 krila; pa onda patent-log, kojim se određuje brzina lađe; potonju spravu lađa vuče u mirnoj vodi, dok Woltmannovu spravu držimo na određenom mjestu u tekućoj vodi; obje te sprave imadu uredbu za brojenje okreta. — Brodski vijak ili propeler (engl. prema lat. *propello, gonim*) zamisliše već u 18. vijeku, ali je š njime prvi znatniji uspjeh polučen tekar oko g. 1837. Isprva uzimahu samo jednu vijčanu plohu. Slučajni prelom takvoga vijka pokazao je, da je dobro uzeti samo malo uzvoja te plohe. Najposlije uzeli su samo „krilo“ kao dio vijčane plohe i uz to su broj tih krila povećali. Tako sad imamo propelere sa dva krila (dvije vijčane plohe), sa tri krila i t. d. — Brodski vijak izbacujući vodu daje joj osim translatornog gibanja još i rotaciju, a to je za pogon lađe bez koristi. Wagner (1906.) izumio je protuvijak, koji podsjeća na vodilju turbine, a učvršćen je iza vijka. Vijak dakle otiskuje vodu kroz protuvijak, koji poradi zgodna namještaja svojih pera oduzimlje vodi rotaciju, pa kod toga i sam pomaže goniti lađu. Time postaje pogon znatno ekonomičniji. (Ima primjera, gdje se protuvijak učvrsti ispred vijka.)

87. Hidraulički ovan. Ako iz spremišta R voda teče kroz cijev, voda ima kinetičku energiju. Zatvori li se naglo put vodi, ta se energija odmah uništi i nastaje „udarac vode“, koji može cijev — ako nije dosta čvrsta — rastrgati. Ako se u isti čas otvori vodi put kroz drugu cijev, koja vodi u vis, voda se znatnom snagom uspne, pa može doseći nivo, koji je iznad nivoa vode u spremištu. Tim načinom diže vodu „hidraulički ovan“ (J. M. Montgolfier 1796.), pri kojemu se spomenuto zatvaranje i otvaranje cijevi izvodi automatično ventilima A i B (sl. 91.). Ventil A, kad se spusti (zbog težine), otvori vodi izlaz napolje; struja vode postaje sve jača, dok sama ne digne ventil A, te sebi zatvori put. U taj čas tlak naraste, te digne ventil B i time otvori put u visoko spremište S. Voda ne može da se iz spremišta S povrati, jer se ventil B zbog svoje težine odmah opet zatvori. Ventil A opet padne i igra se nastavlja. (Prostor P, u kojemu se iznad vode nalazi uzduh, služi tome, da se elastičnošću uzduha ublaži udarac vode, a tlak djeluje bez prekida.)

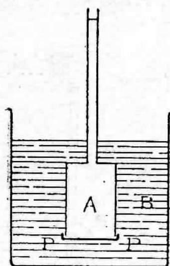


Sl. 91.

Djelovanje hidrauličkoga ovna ne protuslovi Torricellijevu poučku o visini mlaza vode (§ 84.); voda se doduše diže iznad nivoa vode u spremištu, iz kojega je došla, ali to vrijedi samo za dio vode, dok drugi dio iscuri na niži nivo. U jednom je primjeru bio razmak nivoa visokoga i niskoga spremišta 16 m, dok je ventil A stajao 4 m ispod nižega nivoa; kod svakoga titraja ventila digla se u više spremište 1 litra (kg) vode, a kraj ventila iscurilo je 6 litara. Potencijalna se energija dakle povećala za $1 \times 16 = 16$ kg*m, a u drugu ruku umanjila za $6 \times 4 = 24$ kg*m. Gubitak energije dolazi koje od trenja, koje otuda, što voda kraj ventila ne izlazi s brzinom 0, već odnosi kinetičku energiju. Još je znatniji gubitak tvari, kojemu se ne bismo mogli ni onda ukloniti, kad bi se sva energija sačuvala.

Ovnovi služe samo u malenom, na pr. za dizanje vode do osamljenih kuća. Ima ih, koji dižu vodu do 100 m visine.

88. Difuzija. Ako se na tekućinu veće gustoće oprezno nalije sloj rjeđe tekućine, a tekućine se mogu miješati, ne će one ostati razlučene, kako bismo po djelovanju teže očekivali, nego će se miješati. Granica tekućina postaje sve manje oštra, dok nakon oduljega vremena ne dobijemo jednu jedinu homogenu smjesu. Taj se pojav zove difuzija (lat. *diffundo, širim se*). Brzina difuzije zavisi i o tom, dokle je miješanje već uznapredovalo; difuzija traje, doklegod imade u smjesi mjesta različite koncentracije (koncentracija je omjer mase jedne sastojine i mase smjese). Brzina je difuzije velika, ako se dijelovi različitih koncentracija tiču u širokim plohama. Ako tekućinu „miješamo“ t. j. mehanički uzburkavamo, stvaramo velike dodirne plohe i time difuziju pospješujemo. — Pojav se difuzije tumači molekularno-kinetičkom teorijom tvari. Po toj teoriji svu tvar sačinjavaju čestice, molekule, koje se neprestance giblju; molekula se jedne tekućine zaleti u šupljine među molekulama druge tekućine i tamo sve dalje zabasa.



Sl. 92.

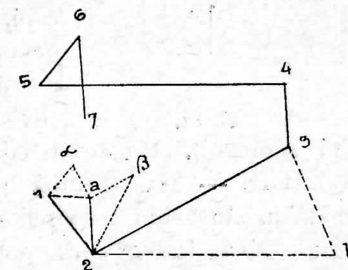
89. Osmoza. Tekućine se mogu miješati i kroz porozne (grč. πόρος, *prijelaz, otvor*) stijene ili membrane (lat. *kožica*) na pr. kroz glinenu stijenu, svinjski mjehur, pergamenat i t. d. Ako od dvije posude A i B (sl. 92.) rastavljene pergamentom PP jednu, A, napunimo rastopinom modre galice, drugu, B, do jednake visine čistom vodom, nakon oduljeg će se vremena u obje posude nalaziti modra galica jednake koncentracije. Čista je voda išla u rastopinu, dok je modra galica putovala obrnutim smjerom k vodi. Brzina prelaženja stoji među inim do toga, koja tvar prolazi kroz stijenu i koje je vrsti stijena. U spomenutom primjeru brže prolazi voda negoli galica, pa je isprva toliko znatno prelaženje vode, da se nivo tekućine u posudi A digne iznad izvanjega nivoa; osobito se to znatno opaža, ako je posuda A gore sužena. — Pojav se miješanja kroz porozne stijene zove osmoza (grč. ὠθέω, *guram*); prvi ga je ispitao Dutrochet (1826. i dalje).

90. Rastopine. Tutkalo ili kelje, bjelance i mnoge druge tvari ne mogu prodirati kroz porozne stijene; te se tvari zovu koloidi (grč. κόλλα, *tutkalo*; εἶδος, *izgled*). Razlika između koloidalne rastopine i „prave“ rastopine dolazi otuda, što su čestice koloida u rastopini velike. Međutim ako i ne mogu čestice tutkala proći kroz pergamenat, ipak ih propušta bugačica; pore su bugačice očito dosta široke. — Od koloidalnih se rastopina opet veličinom čestica razlikuju suspenzije i emulzije. Suspenzija je tekućina, u kojoj lebde sitne čvrste čestice (lat. *suspendo, pustim lebdjeti*); u emulziji lebde sitne kapljice druge tekućine („emulzija“ znači tekućinu poput mlijeka; lat. *emulgeo, izmuzem*). Suspendirane čestice mogu se vidjeti mikroskopom, a kroz bugačicu se ne mogu proverati. Koloidalne se rastopine znatno razlikuju i od pravih rastopina i od suspenzija i emulzija.

Mlijeko je prava rastopina šećera, koloidalna rastopina bjelančevine, emulzija masti.

91. Brownovo gibanje. Ako mikroskopom motrimo kapljice masti u razrijeđenom mlijeku ili zrnca tuša u vodi, opažamo neko osobito neprestano gibanje tih čestica; one mile i gmižu na sve strane svaki čas mijenjajući smjer i brzinu svoga gibanja. Za gibanje te vrsti isprva se držalo, da pripada samo živim česticama, no botaničar je Brown pokazao (1827.), da je ono opće svojstvo sitnih čestica. Danas tumačimo to „Brownovo gibanje“ molekularnom teorijom. Molekule tekućine neprestano se giblju, te udaraju u čestice, što ih mikroskopom vidimo, i bacaju ih sad amo sad tamo. Što veće su te čestice, to se manje ističe njihovo Brownovo gibanje. Moglo bi se misliti, da je Brownovu gibanju razlog trešnja mikroskopa, no koliko se god mirno namjesti mikroskop, Brownovo se gibanje nimalo ne oslabi. (Već je atomist Lukrecij predviđao tu vrst gibanja[1]); Lucretius, g. 55. pr. Kr.)

Gotovo je nemoguće prikazati Brownovo gibanje crtnjom. Ako se Brownovo gibanje neke čestice snimi kinematografski na pr. sa 30 slika u sekundi, pa onda izostavivši svaku drugu sliku redom crtnjom prikažemo mjesta čestice 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 . . . (sl. 93.) kako slijede u razmacima od $\frac{1}{15}$ sek, slomljena nam crta 1234567 . . vrlo nedostatno pokazuje put čestice; upotrebimo li sve slike, izaći će crta 1a2b3 . . ., a da se put odredio na osnovu 60 snimaka u sekundi, našla bi se crta 1αaβ2 . . . Osjećamo nesigurnost u prosuđivanju puta čestice, jer mu ne umijemo odrediti tangente (krivulja bez tangente!).



Sl. 93.

Teoriji uspjelo je naći matematičke zakone Brownova gibanja (Einstein, Smoluchowski 1905. i dalje), pa su ti zakoni i eksperimentalno utvrđeni.

Brownovo gibanje objašnjava nam, kako mogu u tekućini lebditi čestice, koje su gušće od tekućine. Vazda ima čestica, na koje udarci molekula slučajno baš odozdo češće stižu, pa česticu unatoč sili teže dižu u vis. Dakako što je veća visina, to manje je vjerojatno, da će se čestice do nje

[1]) u eposu „De rerum natura“ (= „O prirodi“).

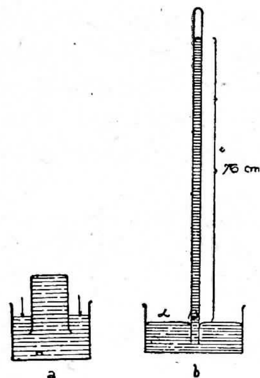
popeti. Kad nastane t. zv. sedimentarna ravnoteža ili ravnoteža taloženja (lat. *sedimentum, talog*), bit će u 1 mm³ blizu površine manji broj suspendiranih čestica negoli u 1 mm³ bliže dnu. Razlika je tih brojeva to veća, što su čestice krupnije. Teoretski nije nemoguće, da bi se i kamen u mirnoj vodi udarcima molekula najedamput digao do zamjetljive visine; no vjerojatnost je za taj događaj gotovo točno = 0, pa bi bilo nesmisleno na nj čekati. — Slično vrijedi za čestice rjeđe od tekućine; prema zakonu plivanja sabirale bi se one na površini, no udarci molekula mogu ih potjerati i u dubljinu. Da se spriječi sabiranje masti na površini mlijeka, pušta se jak mlaz mlijeka na jednu stijenu, da se udarcem rastrgnu čestice masti u još sitnije dijelove, koje će se onda Brownovim gibanjem držati u nutarnjosti tekućine.

4. Mehanika plinova

92. Tlak uzduha. Mehanika se plinova zove aeromehanika (grč. ἀήρ, *uzduh*); aerostatika ispituje ravnotežu plinova, aerodinamika njihovo gibanje. U 17. je vijeku nauka upoznala osnovne činjenice aeromehanike: 1.) da je uzduh težak, 2.) da izvodi tlak i 3.) kako glasi zakon elasticiteta uzduha; uzdušnu sisaljku izumiše sredinom 17. vijeka.

Tlak uzduha i veličinu njegovu našao je Torricelli (1644.).

Ako se čaša uroni u vodu tako, da se sasvim napuni vode, pa ako se onda čaša u vodi prevrne i digne toliko, da rub ostane ispod površine vode, voda će sveudilj ispunjavati čašu, te će sezati iznad nivoa izvanje vode (sl. 94.a). U staro se doba reklo, da je to zato, jer se priroda „boji praznine". Danas ne sumnjamo, da vodu drži u čaši sila, kojom uzduh tlači izvanju površinu vode. Torricellijev se pokus od opisanoga u bitnosti razlikuje samo time, da se umjesto čaše uzme odulja cijev na jednom kraju zatvorena, a umjesto vode živa. Da ne treba uzeti veliku posudu sa živom, cijev se i posuda napune svaka za se, onda se cijev začepi, okrene, donjim krajem podroni pod živu u posudi i onda odčepi (sl. 94.b). Tekućina u cijevi ne će sezati više nego li kojih 76 cm iznad nivoa žive u posudi (ako se pokus pravi na površini morskoj). Prostor u cijevi iznad tekućine zove se Torricellijev prostor. — Tlak uzduha u kojojgod točki α izvanje površine žive jednak je tlaku, što vlada u jednako visokoj točki β u cijevi. Ako je specifična težina žive 13·6 g*/cm³, potonji se tlak izračunava množenjem (§ 74.) 76 × 13·6, dakle je jednak 1033 g*/cm². Prema tome tlak uzduha iznosi nešto više nego li 1 kg*/cm². — Da se Torricellijev pokus izvede s vodom treba cijev, koja je bar 13·6 puta dulja od 76 cm, jer je voda 13·6 puta lakša od žive. To je 1033 cm, dakle više od 10 m. (Pokus izveo je Pascal 1647.)



Sl. 94.

Tim se pokusima objasnilo, zašto obične sisaljke ne mogu vodu crpsti iznad 10 m visine; vodu tjera u sisaljku tlak uzduha. — Uostalom ipak se dade zamisliti, da bi se tlakom uzduha voda, u kojoj nema zraka, mogla dići i preko 10 m visoko; iznad te visine bio bi tlak vode negativan, a voda se zbog kohezije ne bi rastrgala.

Pokus s „Magdeburškim polukuglama" (Guericke 1654.).

Zad. **64.** Kolika je težina atmosfere, ako je površina zemaljska 510 × 10⁶ km², a tlak na površini 1·03 kg*/cm²? [5250 × 10¹² tona*]

93. Barometar. Ako je namještaj Torricellijeva pokusa udešen kao osobita sprava, zove se barometar ili tlakomjer. (Grč. βαρός, *težak*.) Tlak se uzduha i drugih plinova često mjeri na *mm*; pri tome znači na pr. „tlak 674 mm", da uzduh može držati stupac žive visok 674 mm. — Kako se specifična težina žive mijenja s temperaturom, a i s položajem na površini zemaljskoj, ne običavamo tlak izražavati neposredno izmjerenom visinom žive, već na osnovu izvedenoga mjerenja izračunamo, kolika bi ta visina bila kod 0° C na površini morskoj pod geogr. širinom 45°. Ako tim načinom u nekom primjeru izađe tlak 760 mm, zove se tlak 1 normalna atmosfera. (Lat. *norma, kutna mjera, propis.*) Vrijedi jednadžba: 1 normalna atmosfera = 1·033 tehničke atmosfere. (§ 71.)

Na lađi stupac žive barometrove nešto je viši, kad lađa plovi prema istoku, negoli kad ide obrnutim smjerom. U oba je naime primjera brzina vrtnje oko zemaljske osi nešto različna, pa je i centripetalna sila žive svaki put druga. (Eötvös, 1908.)

Torricellijev prostor nije prazan, već sadrži živine pare. I one izvode tlak, te živa u cijevi stoji niže nego što bi stajala, da nema živinih para. Međutim našlo se, da je tlak živinih para vrlo malen, te je njime nivo žive jedva za 0·001 mm potisnut. — Ako cijev nije dosta široka, nastaje kapilarna depresija.

Kao jedinica tlaka uzduha u novije je vrijeme definiran još i 1 bar = 10⁶ din/cm², te je tlak 750 mm ≐ 1 bar (zašto?); u meteorologiji upotrebljava se 1 milibar = 0·001 bar ≐ ¾ mm. — Nije lijepo, da se „mm", ime jedinice dužine, upotrebljava i kao ime jedinice tlaka. Zato preporučuju, da se mjesto „tlak 1 mm" kaže „1 tor" (čitaj: tōr; prema: Torricelli!). Točnije vrijedi: 1 milibar = 0·75006 tor.

Kovni je barometar (Vidie 1845.) limena plosnata kutija, kojoj je jedno dno valovito, da popušta tlaku izvanjega uzduha. Iz kutije je uzduh što bolje isisan, pa kako tlak uzduha raste ili pada, spomenuto se dno više ili manje ulekne. Pri tome se doduše točke dna samo sasvim malo pomiču, ali zgodan mehanizam prenosi gibanje na kazaljku, kojoj krajnja točka izvodi pomake nekoliko stotina puta veće. Kovni se barometar lako prenosi, ali mu je točnost nepouzdana. Ljestvica se kovnog barometra načini ispoređujući kovni i živin barometar kod različitih tlakova (empirijska ljestvica; grč. ἐμπειρία, *iskustvo*).

Za mjerenje tlaka u razrijeđenom prostoru upotrebljava se skraćeni barometar sa živom; na pr. barometar visok 1 dm.

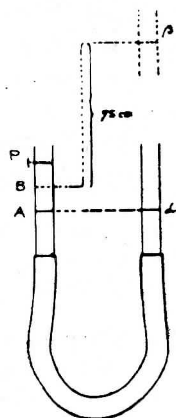
Zad. **65.** Gustoća je žive kod 0° C 13·60 g/cm³, kod 20° C 13·55 g/cm³; ako tlak uzduha drži živu kod 20° C 758·3 mm visoko, do koje bi visine isti tlak dizao živu kod 0° C? [755·5 mm]

Zad. **66.** Na površini je morskoj akceleracija teže na ekvatoru 978·0 cm/sek², na mjestu sa širinom 45° 980·6; ako uzduh na ekvatoru drži živu 758·0 mm visoko, do koje bi je visine držao jednak tlak uzduha kod jednake temperature na širini 45°? [756·0 mm]

94. Elastičnost uzduha. Zakon elastičnosti plina pokazuje, kako se mijenja tlak plina p, ako mu promijenimo obujam v. Tlak je plina obrnuto razmjeran obujmu (isp. primjere u § 1.); matematički:

$$p = \frac{konst}{v} \quad \text{ili} \quad p \cdot v = konst.$$

Taj se „Boyleov zakon" (Boyle 1662.) dokazuje spravom, koja sastoji iz dvije vertikalne staklene cijevi, od kojih je jedna pomična, a druga učvršćena, a nalaze se ispred vertikalnih ljestvica, razdijeljenih na cm. Donji su krajevi cijevi spojeni oduljom kaučukovom cijevi. Nepomična cijev ima na gornjem svom kraju slavinu, da se može uzduh u cijevi zatvoriti. Isprva se cijevi napune živom, te živa stoji u njima jednako visoko, na pr. do A i α (sl. 95). Tlak se uzduha izmjeri barometrom, pa neka je na pr. 75 cm = 1·02 kg*/cm². Pod tim tlakom stoji i uzduh između slavine P i površine A. Kad se slavina zatvori, tlak se uzduha ne promijeni u prostoru AP. Ako se sada pomična cijev diže, raste nivo žive u nepomičnoj cijevi i obujam se uzduha ispod slavine smanjuje. Kad živa dođe do B, te je obujam = $^1/_2$ obujma PA, živa stoji u pomičnoj cijevi za 75 cm više negoli u nepomičnoj. Sada je tlak uzduha na površinu B jednak tlaku 75 cm visokoga stupa žive povećanom za tlak izvanjega uzduha, t. j. 75 + 75 = 2 · 75 cm. Polovici obujma pripada dakle dvostruki tlak. — Kad bi bio obujam $PB = ^2/_3$ obujma PA, razmak bi nivoa B i β iznosio $37^1/_2$ cm, dakle je tlak zatvorenoga uzduha $37^1/_2 + 75 = ^3/_2 \cdot 75$ cm. i t. d.



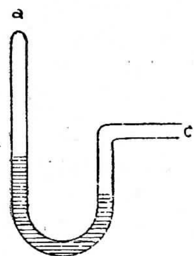
Sl. 95.

Obujam određene množine tvari obrnuto je razmjeran gustoći njezinoj. Kako je tlak plina obrnuto razmjeran obujmu, bit će on dakle upravno razmjeran gustoći ρ. Prema tome se Boyleov zakon može bilježiti i ovako

$$p = c \cdot \rho.$$

Treba napomenuti, da Boyleov zakon vrijedi uz uvjet, da se temperatura plina ne mijenja.

Boyleov se zakon mnogo primjenjuje; na pr. kod zatvorenoga manometra (sl. 96.). To je savinuta cijev, kojoj je jedan kraj, a, zatvoren, dok se drugi kraj, c, može spojiti sa spremištem plina, kojemu želimo odrediti tlak. Cijev je donekle ispunjena živom ili drugom tekućinom, koja zatvara ispod a određenu množinu plina. Što je veći tlak u spremištu, to je manji obujam zatvorenoga plina, pa se po obujmu taj tlak i određuje. (Mariotte 1684.)



Sl. 96.

95. Težina plinova. Da je uzduh težak, pokazao je Galilei (1640.). Specifična je težina uzduha kod 0° C i tlaka 1 normalne atmosfere jednaka 1·293 g*/litra.

Taj se broj može odrediti ovako: Stakleni balon (franc. *ballon*) pun uzduha odvagne se. Onda se uzduh — koliko možemo — ustima isiše, balon slavinom zatvori i opet odvagne. Koliko se težina umanjila, toliko važe isisani uzduh. Najposlije se slavina u vodi otvori, te tlak izvanjega uzduha potjera toliki obujam vode u balon, koliko je uzduha isisano; novim vaganjem dobiva se težina te vode, dakle i obujam isisanoga uzduha. Težina se isisanog uzduha onda podijeli sa njegovim obujmom.

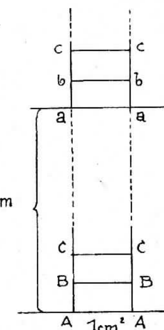
Tlak uzduha atmosfere dolazi od težine uzduha. Iznad vrha brijega nalazi se manje uzduha negoli iznad podnožja; zato se tlak uzduha umanjuje, kad se penjemo uzbrdo. (Mersenne, Pascal 1648.) Ako se kod 0° C u uzduhu tlaka 1 normalne atmosfere popnemo za 10·5 m, tlak spadne za 1 mm. To znači, da valjkovit vertikalan stup uzduha, koji stoji nad 1 cm² horizontalne površine, a visok je 10500 mm, važe toliko, koliko stup žive visok 1 mm. Živa je dakle 10500 puta teža od uzduha. Otuda slijedi, da je voda 10500 : 13·6 puta teža od uzduha i da je specifična težina uzduha 13·6 : 10500 = 0·0013 g*/cm³ = 1·3 g*/litara (metoda Mariotteova).

Ako je čaša na vagi u ravnoteži, a u čašu se nalije plin teži od uzduha, na pr. ugljikov dvokis ili eterove pare, čaša prevagne. Plinovi lakši od uzduha spremaju se u obrnutim čašama, pa se mogu i preliti iz jedne obrnute čaše u drugu.

Zad. **67.** Koliko važe uzduh u sobi dugoj 6 m, širokoj 5 m, a visokoj 4 m? (0°C) [155 kg]

Zad. **68.** Kolika bi bila visina atmosfere, da je ona u svima visinama jednake gustoće 1·293 gram/litra, a izvodila bi na zemlji tlak, kolik izvodi stupac žive visok 76 cm? [T. zv. visina homogene atmosfere = 8·0 km]

96. Mjerenje visine barometrom. Ispitat ćemo, po kojemu se zakonu umanjuje tlak uzduha, kad se dižemo u više njegove slojeve. Zamislimo u horizontalnoj ravnini, gdje je tlak 1 atmosfera, komad površine AA = 1 cm² i nad njim vertikalan valjkast stup uzduha (sl. 97.) U prorezu aa, koji je 1 km iznad AA, vlada tlak 0·882 atm (ako je temperatura 0° C). Razdijelimo stup uzduha u slojeve $AABB$, $BBCC$, ... $aabb$, $bbcc$, ... koji su visoki po 1 cm, te je $= C = \ldots = ab = bc = \ldots = 1$ cm. Koliko je puta tlak u AA veći od tlaka u aa, toliko je puta — po Boyleovu zakonu — gustoća uzduha u sloju $AABB$ veća od gustoće u sloju $aabb$, toliko je dakle puta prvi sloj $AABB$ teži od sloja $aabb$. Prema tome kada se penjemo na putu AB ili na putu ab, tlakovi se umanje za veličine, koje su u onom istom omjeru, u kojem stoje i sami tlakovi. No ako u dvije odbidbe suptrahendi stoje u omjeru, u kojem i minuendi, bit će i diferencije u tom omjeru. Dakle je tlak u bb jednak 0·882 tlaka u BB. Tako isto razabiramo, da je tlak u cc jednak 0·882 tlaka u CC. I t. d.



Sl. 97.

Isti omjer tlakova vrijedi dakle za kojagod dva mjesta, kojih je vertikalni razmak 1 km. Odatle slijedi da su

u visinama $x = 0$, 1 , 2 , 3 , . . . km
tlakovi $p = 1$, 0·882 , $0{\cdot}882^2$, $0{\cdot}882^3$, . . . atmosfera.

Tlak i visina vezani su dakle formulom $p = 0{\cdot}882^x$. Logaritmiranjem dobiva se onda

$$x = -\ 18{\cdot}4 \ log\ p \text{ (kilometri, atmosfere).}$$

Do istoga bi se rezultata došlo, da smo za Aa umjesto 1 km odabrali koji drugi razmak. Ovdje izvedeni zakon tlaka može se ovako izreći: rastu li visine aritmetičkom progresijom, tlakovi se umanjuju geometrijskom progresijom (Newton).

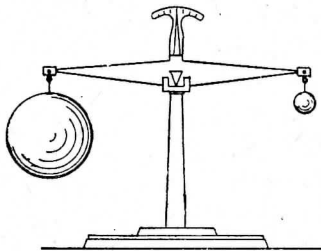
Na osnovu gornje formule može se iz tlaka uzduha izračunati visina nekoga mjesta. Treba uostalom pripomenuti, da bi ta formula vrijedila samo, kad bi temperatura bila 0° C; uistinu se temperatura s visinom mijenja, te se zato u praksi upotrebljavaju zamršenije formule.

Gustoća je zraka razmjerna tlaku; kad se dakle penjemo, gustoća se umanjuje po isto onakvom zakonu kao i tlak. Našlo se, da jednak zakon vrijedi i kod sedimentarne ravnoteže (§ 91.); po njemu se vlada gustoća čestica, što su u tekućini suspendirane; pri tome je „gustoća" broj čestica u sitnom obujmu, koji se uzimlje za jedinicu; čestice se broje motreći mikroskopom, koji je horizontalno namješten.

Zad. **69.** Do koje bismo se visine morali popeti, da tlak uzduha spadne na polovicu a temperatura bi svagdje bila 0° C? [5540 m]

Zad. **70.** Gustoća je rasvjetnoga plina manja od gustoće zraka; tlak je u plinovodu nešto veći, negoli u uzduhu; je li razlika tlakova veća u prizemlju ili u III. spratu?

97. Uzgon u plinovima. Arhimedov zakon vrijedi i za tjelesa uronjena u uzduh. Svako je tijelo u uzduhu ili u drugom plinu prividno lakše negoli u praznom prostoru i to za toliko, koliko važe istisnuti plin. Kod točnijega vaganja treba taj gubitak težine uzeti u račun. Utjecaj kod vaganja jasno pokazuje sprava prozvana dazimetar (sl. 98.; grč. δασύς, *gust*), (Boyle); to je poluga, na kojoj su u ravnoteži staklena šuplja oveća kugla i malen utez; ako se uzduh okoliša razrijedi, staklena kugla prevagne; premjesti li se dazimetar u eterove pare, prevagne utez (zašto?). — Po gubitku težine nekoga predmeta u plinu može se odrediti specifična težina plina (Luxova vaga za rasvjetni plin).



Sl. 98.

Uzgon diže zrakoplove. Mongolfijera jest zrakoplov, koji se diže, jer je u njemu topao zrak, a taj je specifički lakši od hladnoga zraka. (Braća Montgolfier 1782.) Obično se „baloni" pune vodikom (Charlier 1783.) ili rasvjetnim plinom (Minckelaers 1783.) u najnovije doba i helijem. Potonji se uovećoj množini dobiva iz zemljanoga plina, što izvire u Teksasu; prednost mu je, što nije opasan, jer ne može gorjeti; od vodika je teži samo dva puta. Zgodan je balončić mjehur od sapunice, nadut rasvjetnim plinom. — Ako 1 m³ zraka važe 1·3 kg*, 1 m³ vodika 1/14 od toga, prividna je težina 1 m³ vodika u uzduhu $\frac{1}{14} \cdot 1{\cdot}3 - 1{\cdot}3 \doteq -1{\cdot}2$ kg*. Balon sa 10000 m³ vodika može dakle zajedno s balastom težiti najviše $10\,000 \times 1{\cdot}2 = 12\,000$ kg*.

Kad se diže ili spušta balon, koji nije potpuno nadut, uzgon se ne mijenja; doista kad bi se balon spustio na nivo dvotrukoga tlaka, obujam bi balona spao na polovicu (Boyle-ov zakon!), dakle je obujam istisnutoga zraka polovica; no kako se gustoća zraka podvostručila, težina se istisnutoga zraka nije promijenila, pa je i uzgon ostao isti. Prema tome, ako bacivši balasta, podamo balonu neznatan uzgon, on se ne će samo malo uspeti, nego dotle, dok se sasvim ne nadme. — Plinu u balonu treba dati priliku, da — ako ustreba, — izađe. Ako se potpuno nadut i zatvoren balon diže, on će već iza uspona od nekoliko stotina metara eksplodirati.

Slobodni a i pripeti balon često već poslužiše naučnim svrhama. A. Piccard digao se g. 1932. zatvoren u kugli, koja je visjela na balonu, do visine malne 17 km, pri čemu je izmjeren tlak zraka izvan kugle 73 mm. — Baloni sonde ne nose putnika, već samo meteorološke sprave, koje bilježe tlak, temperaturu i t. d.; a prepušteno je sreći, hoće li se iza pada naći. (Franc. *sonder, mjeriti dubinu, ispitivati.*) Uspeli su se i iznad 30 km visine. — Baloni piloti puštaju se, da motreći ih odredimo smjer i brzinu vjetra u visinama.

Upravljivi zrakoplov (opisao ga Meusnier 1786.) treba da je oblika duguljasta i stalna. Kad ide protiv vjetra, treba da mu je brzina relativno spram zraka veća od brzine vjetra. Poput lađe ronilice može mijenjati visinu dinamički, djelovanjem zgodnih kormila Ima plohe za stabiliziranje, koje djeluju kao pera u strelice. — Zrakoplov „cepelin" sastavljen je od ovećega broja balona, koji su poređani u unutrašnjosti krute valjkaste ljuske, te se izvana ne vide. (Zeppelin 1900.)

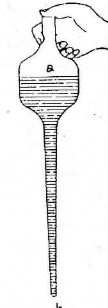
Zad. **71.** Za koliko je 1 kg platine u uzduhu teži od 1 kg žute mjedi? (Specifične težine u § 21.!) [za 87 mg*]

Zad. **72.** Balon, koji može obuhvatiti 1300 m³ plina, napunjen je sa 800 m³: u kojoj će se visini sasma naduti? (0° C) Neka se primijeni Boyleov zakon i formula § 96. [3879 m]

Zad. **73.** Našlo se, da se zatvoreni balon od kaučuka diže do velikih visina stalnom vertikalnom komponentom brzine. Balon, kojemu je brzina dizanja 150 m/min, vidimo 17 min iza uzleta u visini 21·6°; kolika je horizontalna projekcija njegove udaljenosti? [6440 m]

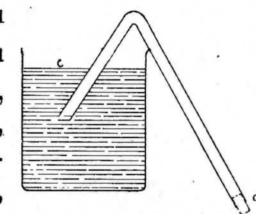
Zad. **74.** Aristotel tvrdi, da mješina puna zraka važe više nego li prazna; ako uzmemo, da je tlak u mješini od prilike jednak tlaku izvanjemu, valja li Aristotelova tvrdnja?

98. Pneumatičke sprave staroga vijeka. 1. Iz obične teglice ili nategače (sl. 99.), kad je odozgo prstom zatvorena, iscuri tekućina samo dotle, dok ne bude ravnoteža između težine tekućine, tlaka zatvorenoga uzduha (kod a), tlaka izvanjega uzduha (kod b), i napetosti površine (kod b). — Malena takva sprava zove se pipeta (frac. *pipette*).



Sl. 99.

2. Tekućina, koja curi iz posude kroz savitu teglicu (sl. 100.), zbog toga se ne rastrgne, jer je stisnuta tlakom uzduha (kod c i d). Onaj kraj teglice, koji nije uronjen u posudu, treba da se nalazi ispod nivoa tekućine u posudi. Kad bi bila teglica na tom kraju začepljena, čep bi pritiskivao tekućinu većom silom negoli uzduh, jer se nalazi ispod nivoa c. Kad se čep ukloni, zamijeni se čep uzduhom, pa kako je njegov tlak manji, tekućina kao da izgubi nešto svoje potpore i stane

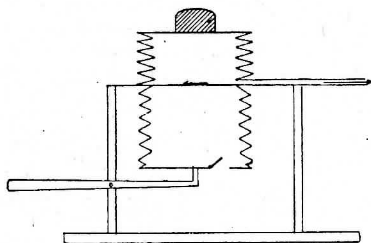


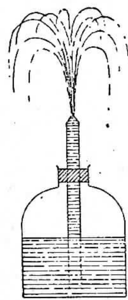
Sl. 100.

curiti. — Da teglica može raditi, treba je najprije napuniti tekućinom (na pr. sisanjem).

Gdjekoje hidroelektrične središnjice prebacuju suvišnu vodu kroz velike nategače, koje prenose makar čitavu rijeku vode. Kod slobodnoga je prelijevanja vode preko stijene debljina sloja, što se prebacuje, malena; naprotiv je u nategače prorez velik, pa sloj prebacivane vode u koljenu nategače seže makar metar visoko iznad nivoa vode. Zbog toga uredba za prebacivanje ne treba da bude široka, a to pojeftinjuje gradnju. (G r e g o t t i 1910.) Te nategače započinju automatički raditi, kadgod gornja voda bude previsoka.

3. S a s t a v l j e n i m i j e h (sl. 101.) složen je od dva mijeha; donji tjera uzduh u gornji, dok gornji daje struju, što je trebamo. Ta je struja dosta stalna, jer na gornji mijeh pritiskuje utez. Uzduh unilazi u gornji mijeh, kad je tlak dolje dosta jak, da digne ventil.

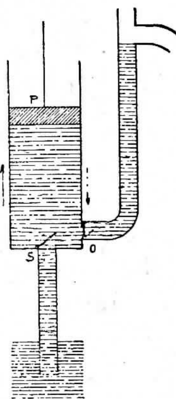

Sl. 101.


Sl. 102.

Teglice i mijeh bili su poznati već starim Egipćanima.

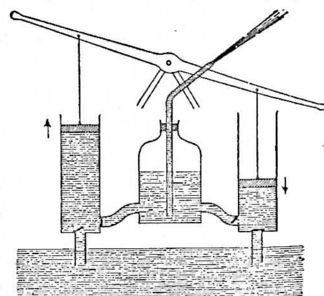
4. U t. zv. H e r o n o v o j b o c i (sl. 102.) zgusnuti uzduh ili drugi plin pritiskuje tekućinu, pa je viškom svoga tlaka tjera kroz cijev napolje. Boca za sodavodu; kemijska boca štrcaljka.

5. V o d e n a s i s a l j k a n a t l a k predočena je u sl. 103.; može dići vodu nekoliko stotina metara visoko. Kad se klip *P* diže ventil je *O* zatvoren, a ventil se *S* otvori i propušta vodu, što je tlak uzduha odozdo utiskuje. Kad se klip tjera natrag, ventil se *S* zatvori i voda se uz ventil *O* diže u vis.



Sl. 103.

6. V a t r o g a s n a š t r c a l j k a (sl. 104.) sastoji od dvije sisaljke na tlak i „vjetrišta", koje je zapravo Heronova boca. Sisaljke naizmjence tjeraju vodu u vjetrište, a tlak uzduha u vjetrištu izbacuje vodu u n e p r e k i d n o m mlazu. (K t e z i b i j, Κτησίβιος, 2. vij. pr. Kr.).

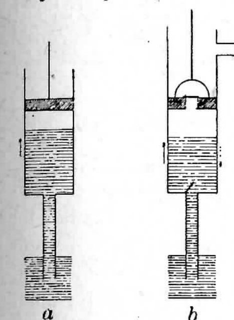

Sl. 104.

7. O b i č n a s i s a l j k a. Sl. 105*a* podsjeća na jednostavni pojav, na kojemu se osniva djelovanje sisaljke za vodu; kad dižemo klip, diže se

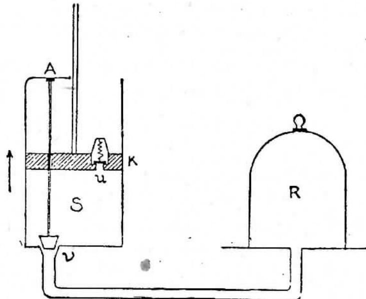
ispod njega i voda, jer je tjera tlak izvanjega uzduha. Sl. 105*b* pokazuje samu sisaljku i igru obaju njezinih ventila.

Nauku o tim i srodnim spravama Grci su zvali p n e u m a t i k o m (πνεῦμα, *zrak u gibanju*).

99. Uzdušne sisaljke. U z d u š n a s i s a l j k a s ventilima (sl. 106.) donekle naliči običnoj sisaljci. U „r e c i p i j e n t u" *R* (lat. *recipio*, primam), koji stoji na „t a n j u r u", treba uzduh rastanjiti. Kad se k l i p *K* u s a r i *S* diže iz svog najnižeg položaja, uzduh se recipijenta kroz spojnu cijev raširi još i u saru; uzduh se dakle razređuje. Donji se ventil *v* ove sisaljke ne diže kao kod obične sisaljke razlikom tlakova, već je pričvršćen na kraju štapa, što ga klip trenjem poteže gore dolje: tlakovi su naime — kad razređenje uznapreduje — premaleni, a da bi mogli svladati težinu ventila. Da spomenuti štap ne odvuče ventila previsoko, udari štap iza kratkoga pomaka na zapreku kod *A*. — Kada je klip potisnut do dna sare i time suvišni uzduh iz sare istjeran, ostaje ipak još ispod gornjega ventila *u* malen „š k o d l j i v" prostor, koji je ispunjen zrakom običnoga tlaka; zbog toga se iz sare, pa ni iz recipijenta, ne da sav uzduh istjerati.



Sl. 105.

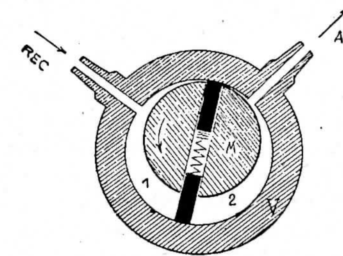


Sl. 106.

S i s a l j k a s a s l a v i n a m a. (G u e r i c k e.)

S i s a l j k a s a m l a z o m v o d e. Kod B u n s e n o v e sisaljke (B u n s e n 1869.) mlaz vode poteže sa sobom uzduh. Ta sisaljka ne može izvući iz recipijenta vodenih para; njihov je tlak kod 20°C 17 mm. Gdje ne treba velikoga razređenja, ta je sisaljka vrlo prikladna.

S i s a l j k a s o b r t a n j e m k l i p a. Ima sisaljki, kod kojih se voda ili plin gone klipom, koji se vazda u istom smjeru vrti. Od te je vrsti sisaljka G a e d e o v a, kojoj je najznatniji dio predočen u sl. 107. U šupljini željeznoga valjka *V* vrti se masivan manji valjak *M*, koji je ekscentrično namješten, a na gornjoj se strani tiče valjka *V*. Kroz diamentralni prorez u masivnom valjku metnute su dvije „pomicaljke", koje su rastavljene ocalnim perom,



Sl. 107.

te šupljinu rastavljaju u 2 ili 3 dijela, kako slika pokazuje. Dio je 1. u svezi s recipijentom *R* i, kako raste, siše uzduh iz recipijenta; dio se 2. umanjuje i suvišni uzduh iz njega izlazi uz ventil *A*. — Klip se vrti motorom. Uzduh se može razrijediti ovom sisaljkom do tlaka 0·01 mm. (Kako se mjere takvi sitni tlakovi, ne ćemo razlagati.)

Za još veća razređenja služe danas sisaljke sa živinim parama. Takva je sisaljka spojena na jednoj strani s recipijentom, na drugoj s pomoćnom sisaljkom (na pr. Gaedeovom). U dnu sisaljke grije se živa, da vri, tako da nastaje mlaz živinih para; taj poteže za sobom ostatke uzduha iz recipijenta i prevodi ih k pomoćnoj sisaljci. Izvršivši posao pare se hlađenjem pretvore u tekuću živu, koja se zgodnim putovima vraća u dno sisaljke (Langmuir 1916.).

Da se plin stlači na tlak veći od 1 atmosfere, služe osobite zguštavaljke ili kompresori (lat. *compressus, stiskanje*).

Primjene sgusnutog i razrijeđenog uzduha. Potiskivanje uzduha u ronilačko zvono (Papin 1692.). — Gradnje pod vodom u kesonima (franc. caisson). — „Pneumatik“ na kotačima automobila i dvokolica; bez toga ne bi se dala podnesti trešnja (nanovo izumio Dunlop 1890.). — Pneumatična pošta u velikim gradovima; stanice su spojene cijevima, u koje pristaju valjkovite poštanske kutije; zgusnuti uzduh tjera kutiju protiv uzduha običnoga tlaka ili uzduh običnoga tlaka tjera kutiju protiv tlaka razrijeđenoga uzduha (Clark 1853.). — Ako se struja zgusnutoga zraka tjera kroz pijesak, nastaje struja pijeska, koja služi za graviranje stakla, glađenje površine željeza i t. d. — Westinghouseov automatični zavor za željezničke vlakove (1875.). — Kod pneumatičnog pretovarivanja žita razrijeđeni zrak siše žito na pr. iz lađe na desetke metara visoko i daleko. — Pneumatički alat; na pr. stroj za zakivanje, koji pritiskom zraka izvodi velik broj udaraca u sekundi. — Kod vakuum-čišćenja (lat. *vacuum, prazno*) zgusnutim se zrakom uzvitla nečistoća u prašinu, a ta se odmah siše u razrijeđeni prostor. — Liječenje rijetkim gorskim uzduhom ili pak zgusnutim uzduhom u „pneumatičkim komorama“.

100. Kinetična teorija plinova. Kinetična teorija uči, da molekule plina lete u pravcima na sve strane i „srazovima“ svaki čas mijenjaju svoje gibanje; udaranje molekula na stijene uzrok je tlaku plina. Tom se teorijom jednostavno tumači Boyleov zakon; ako se obujam plina podvostruči, broj se molekula u 1 cm^3 smanji na polovicu, dakle će se i tlak plina sniziti na polovicu, a to je u skladu sa Boyleovim zakonom.

Sraz molekula ne treba pomišljati kao sraz dviju lopta, već nam naziv „sraz“ znači, da su se dvije molekule toliko približile jedna drugoj, da međusobnim uljecajem promijene smjer i brzinu gibanja. — Zbog težine molekule se zapravo giblju u parabolama, ali brzina je molekula velika, pa se komadić puta između dva susjedna sraza praktično ne razlikuje od pravca. — Molekule lete s različitim brzinama, no unatoč tom „molekularnom neredu“ mogle su se računom vjerojatnosti pronaći „statističke“ pravilnosti, kojima brzine udovoljuju. Dade se izračunati, da kod dušika najviše molekula imade brzinu oko 402 m/sek, a u vodiku 1505 m/sek (kod 0° C). Kod 0° C i tlaka 760 mm molekula dušika prevali između dva susjedna sraza prosječno 0·95 mikrona, a u 1 sek srazi se ona 4780 miljuna puta.

Kinetičku hipotezu o plinovima iznosi Dan. Bernoulli 1738., a u 19. je vijeku nanovo i nezavisno zasnovaše i drugi fizičari, pa je danas smatraju teorijom, koju je iskustvo dobro utvrdilo.

101. Daltonov zakon. Ako je u nekom obujmu smiješano nekoliko plinova, tlak je smjese jednak zbroju pojedinačnih ili parcijalnih (lat. *pars, dio*) tlakova, što bi ih plinovi izvodili, kad bi svaki sam ispunjavao dani obujam (Dalton 1802.). Na pr. ako 1 litru kisika od 2 atmosfere tlaka smiješamo sa 1 litrom dušika od 3 atmosfere i smjesu stisnemo opet na obujam 1 litra, tlak je smjese $2+3=5$ atmosfera. Taj se zakon iz kinetičke teorije jednostavno izvodi.

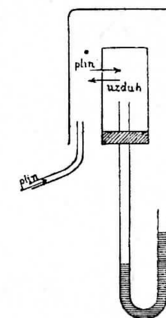
Što je rečeno u § 96. o utjecaju visine na tlak uzduha, treba sada popraviti, jer se tamo nismo obazirali na to, da je uzduh smjesa plinova. Ako iz uzduha uklonimo vodene pare, ima u 100 litara uzduha

dušika,	kisika,	argona (i vrlo malo drugih „plemenitih“ plinova).
78 lit.	21 lit.	1 lit.

To će reći, da na pr. dušik, što je kod tlaka 1 atmosfere sadržan u 100 litara zraka, kod jednakoga tlaka sam ispunjava 78 litara; a kada bi sam ispunjavao 100 litara, bio bi mu tlak $78/100\times1=0{\cdot}78$ atmosfere. Dakle su parcijalni tlakovi dušika 0·78, kisika 0·21, argona 0·01 atmosfera. Još imade u čistom uzduhu nešto ugljikova dvokisa (parcijalni tlak 0·0003) i sasvim malo vodika. Kad se penjemo iznad površine morske, zakon padanja tlaka, što je izveden u § 96., vrijedi za parcijalne tlakove. U dušikovoj bi se atmosferi morali dići za 5·7 km, da tlak spadne na polovicu (0°C), a u vodiku dogodilo bi se to tekar u visini 80 km $=5{\cdot}7\times14$ (dušik je 14 puta teži od vodika). — Do kojih 11 km visine uzduh se vjetrovima neprestance miješa, pa se ne mogu ustaliti iole znatnije razlike njegova sastava. (Iznad ekvatora biva to možda do 17 km visine, iznad polova do kojih 9 km). Taj donji dio atmosfere zove se troposfera; nad njom je stratosfera.

Zad. 75. 2 litre vodika i 1 litra kisika običnoga tlaka smiješaju se i stisnu u obujam $^1/_2$ litre; koliki su parcijalni tlakovi? kolik ukupni tlak?

102. Difuzija i apsorpcija. Ako se zatvorena glinena posuda, u kojoj je zrak, spoji sa manometrom (sl. 108.) i posuda opkoli prevrnutom čašom, u kojoj je rasvjetni plin, manometar će isprva pokazati porast tlaka. Kroz šupljine glinene posude rasvjetni plin unilazi, a uzduh izlazi; pri tome rasvjetni plin, jer je manje gustoće, prelazi brže nego li zrak. Tlak se plina dotle mijenja, dok ne bude parcijalni tlak svakoga plina u posudi i izvan nje jednak. Taj je pojav sličan difuziji kod tekućina, pa se i on zove difuzija.



Sl. 108.

U plinarama određuju gustoću plina po tome, koliko prođe vremena, dok plin difundira kroz uzak otvor. (Bunsen 1857.) — Ako u oveću čašu dahnemo, pa stavimo unutar glinenu posudu spojenu s manometrom, manometar pokazuje smanjenje tlaka; u dahu je čovječjem 4—5 % ugljikova dvokisa, a taj je teži od zraka, te sporije difundira nego li zrak.

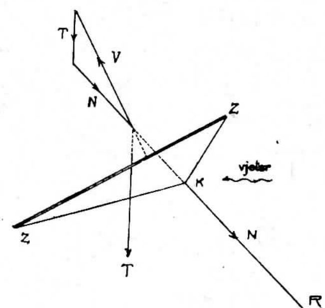
Ako se tekućina tiče plina, određena će množina plina unići u tekućinu. Ta „apsorpcija“ (lat. *absorbeo, srčem)* stoji do toga, kakva je tekućina i kakav je plin. Ako vodu od 20° C prekrijemo kisikom, svaka litra vode „upija“ 28 cm^3 kisika; dušika bi unišlo

samo 14 cm³. Ti se brojevi ne mijenjaju, uzme li se tlak plina velik ili malen; kod tlaka 1 atmosfere uniđe 28 cm³ kisika, koji su stajali pod tlakom 1 atmosfere, a kod tlaka 2 atmosfere uniđe 28 cm³, koji su bili pod 2 atmosfere. Potonja je množina 2 puta veća, pa vrijedi zakon: m n o ž i n a j e a p s o r b i r a n o g a p l i n a r a z m j e r n a t l a k u (W. Henry 1803.). Što viša je temperatura, to manje će tekućina sadržavati plina; kad vodu grijemo, izlaze mjehurići apsorbiranog zraka.

Voda apsorbira mnogo ugljikova dvokisa, a pogotovo mnogo amonijaka. Kod 20° C 1 litra vode može primiti 0·90 litara ugljikova dvokisa, a 654 litre amonijaka. Ti brojevi vrijede, ako je tlak 1 atmosfera; pokazalo se naime, da u tim primjerima zakon Henryjev vrijedi samo krupno približno.

I čvrsta tjelesa sabiraju plinove, na pr. drveni ugalj sabira zrak. Ako se iz ugljena kokosovog oraha žarenjem istjera zrak i ugljen stavi u razrijeđeni uzduh, pa onda temperatura veoma snizi (hladeći sa tekućim zrakom), ostatak se zraka s tolikom snagom prihvati ugljena, da nastane osobito visoko razrjeđenje (D e w a r 1902.). Ta se vrsta upijanja plinova zove a d s o r p c i j a; tu se plin gomila na površini čvrstoga tijela; prema tome šupljikavo tijelo upija zato mnogo plina, jer mu je površina razvedena i velika. — 1 cm³ žice paladijeve u vodiku kod običnoga tlaka i temperature upija do 1000 cm³ plina i pri tome se poveća za 0·1 cm³; budući da za to upijanje vrijede drugi zakoni nego li za prije opisano, ima ono i drugo ime (o k l u z i j a; lat. *occludo, zatvaram*).

103. Zmaj i aeroplan. Kako se drži u visini dječja igračka z m a j, prikazano je u crtnji sl. 109. *ZZ* označuje plohu zmaja, kako bi se sa strane ukazivala. Zmaj je privezan na konopac *KR*, kojega završetak *R* na zemlji držimo u ruci. Kad duva vjetar, možemo na zemlji mirno stajati, a zmaj će lebditi u zraku. Zmaj je na miru, jer sile, što na nj djeluju, stoje u ravnoteži. Te su sile: 1.) težina zmaja *T* kg*; 2.) pritisak vjetra *V* kg*; 3.) napetost konopca *N* kg*. Kako je rezultanta tih sila = 0, poligon sila jest trokut.



Sl. 109.

Da zmaj ne padne, kad prestane vjetar, treba š njime trčati; time se umjetno oko zmaja načini vjetar, a ravnoteža stoji samo do relativnoga gibanja zmaja i uzduha.

Poput zmaja leti i aeroplan (lat. *planum, ploha*). Napetost se konopca ovdje nadomješta silom motora, koja djeluje u horizontalnom smjeru. Motor izvodi silu propelerom, koji je obično na p r e d n j o j strani aeroplana. Plohi *ZZ* zmaja kod aeroplana odgovara n o s i l i c a ili k r i l o; o njegovu obliku v. § 107. Poprijeko se može reći, da aeroplan mora to brže letjeti,

što mu je manja površina nosilice; kad je naime m a l o četvornih metara, treba da je pritisak vjetra na svaki četvorni metar velik, dakle i brzina vjetra velika, da nastane potrebna vertikalna sila.

Kad se motor aeroplana zaustavi, može se aeroplan tako namjestiti, da pada postepeno rek bi skližući se na kosini od uzduha. Tako viđevamo i ptice slijetati s povišenih mjesta bez ikakove radnje.

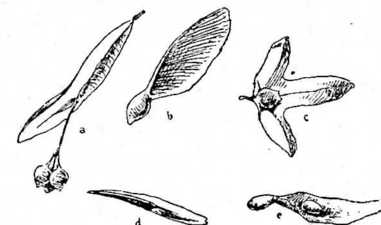
Aeroplan ne može lebdjeti tako, da relativno spram zraka miruje. U mirnom zraku može lebditi sprava, koju dižu vijci, što se vrte oko vertikalne osi i bacaju uzduh prema dolje; reakcija, kojom uzduh djeluje na vijke, drži ravnotežu sili teže. Tako se diže i igračka h e l i k o p t e r a (grč. ἕλιξ, *vijak*; πτερόν, *krilo*).

Ima kukaca, koji umiju lebdjeti na jednom mjestu; njihov se lijet može ispitati h r o n o f o t o g r a f s k i (veliki niz fotografija snimljen u kratko vrijeme, M a r e y), pa izlazi, da su im krila razapeta, kad udaraju prema dolje, a skrenuta u vertikalnu ravninu, kad se vraćaju prema gore.

Ptice, koje „jedre", velikom brzinom i na oko bez ikoje radnje lete u horizontalnom smjeru. Pokusi pokazaše, da na horizontalnu ploču, bačenu horizontalnim smjerom, otpor uzduha djeluje većom silom, ako se ona brže giblje; što veća je brzina, to sporije ploča pada. Prema tome trebat će i ptica u brzom lijetu manje snage, da se uzdrži u zraku, negoli kad sporo leti. U drugu ruku treba jedrenje pomišljati kao gibanje na valovitoj krivulji (otprilike kao na „ruskoj smicalici"); ptica možda iskorišćuje nejednakosti vjetra, pa kad dođe jači udarac vjetra, ptica zgodnim namještajem tijela udesi, da je vjetar digne; gubeći brzinu ona se pri tom penje do neke najviše točke, a odanle se onda spušta brzinom, koja ima neznatnu vertikalnu komponentu, a sve veću horizontalnu, dok je novi udarac vjetra opet ne digne.

Donekle je tome sličan i lijet malenih ptica, kad u dolini vala svoga puta sa mnogo brzih zamaha krila dobiju veliku brzinu, kojom se popnu na brijeg vala, a iz brijega se onda skližu u slijedeću dolinu.

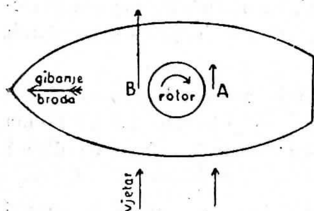
U biljki nalazimo sjemenke sa raznovrsnim uredbama, koje čine, da sjeme sporo pada, te ga vjetar odnese daleko od mjesta, gdje se otkinulo. Lijepo padaju plodovi lipe, javora, graba, jasena, pajasena (ailanthus) i t. d. (sl. 110. a—e).


Sl. 110.

Zmaj je izum Kitajaca; F r a n k l i n u je zmaj poslužio, da dokaže, da je munja električni pojav (1752.). Za ispitivanje gornjih slojeva uzduha danas upotrebljavaju zmajeve, koji imadu oblik pravokutnoga paralelepipeda, a pripeti su na ocjelnoj žici (H a r g r a v e 1896.); ti zmajevi nose meteorološke sprave, a dižu se do znatnih visina (na pr. 7000 m); ako jedan zmaj ne bi mogao nositi sav teret žice, nižu se u određenim razmacima jedan zmaj ispod drugoga.

Aeroplanom prvi su letjeli b r a ć a W r i g h t (1903.), ali je P é n a u d već g. 1871. puštao letjeti modele aeroplana, koji su bili gonjeni napetošću kaučukove niti. G. 1919. uspio je lijet iz Amerike u Evropu (put 3040 km u $16^1/_5$ sata), g. 1926. lijet Spitsbergen-Sjeverni Pol-Spitsbergen (u $15^1/_2$ sata). U mirnom uzduhu čovjek se ne može aeroplanom uspeti ni uzdržati bez motora, koji kraj dostatne snage nije pretežak. Bilo je učenjaka, koji držahu, da nikako ne će uspjeti čovjeku da leti spravom, koja je „t e ž a o d u z d u h a". L i l i e n t h a l se u mnogo lijetova bez motora spuštao s povišenoga mjesta (pri tome zaglavio 1896.).

U zgodnom vjetru umiju danas letjeti jedrilicama bez motora kroz mnogo sati bez prekida; tako je jedan lijet sa „Kronich"-jedrilicom g. 1938. trajao 50 sati 26 min. Lijetovi na obronku Rhönskog Gorja 1921.



Sl. 111.

104. Magnusov pojav. Jedro na lađi kušali su nadomjestiti velikim šupljim vertikalnim valjkom, koji se snagom slabog motora vrti oko svoje osi. Taj valjak, nazvan rotor, trenjem prenosi gibanje na uzduh u okolišu, te nastaje t. zv. cirkulacija uzduha oko valjka. Duva li sada vjetar s boka lađe (sl. 111.), umjetni se vjetar od cirkulacije na jednoj strani rotora, kod *A*, srazi s prirodnim vjetrom, te je na tom mjestu brzina vjetra smanjena, uzduh stisnut i tlak njegov povećan. Taj tlak tjera onda lađu smjerom okomitim na vjetar. Kao kod struje, koja se širi (§ 83.), tako i ovdje vrijedi: gdje je brzina malena, tlak je velik.

Opisani mehanički pojav otkrio je Magnus (1853.). Magnusov se pojav može jednostavno pokazati, ako lahak papirnati valjak (od cigarete) položimo na knjigu i knjigu priklonimo. Valjak će se skotrljati niz knjigu na pr. nadesno, pa kad izgubi podlogu, padajući će se vratiti nalijevo, u prostor ispod knjige. (Dok valjak pada, uzduh se giblje relativno spram valjka smjerom odozdo gore.)

Pokazalo se međutim, da i kod običnog jedra imamo cirkulaciju uzduha; ona nastaje djelovanjem samoga vjetra, ali nije tako jaka, kao umjetna cirkulacija kod rotor-lađe. Isto se tako i pritisak uzduha na aeroplan dovodi u vezu s cirkulacijom uzduha.

105. Mijenjanje tlaka. Tlak atmosfere ide među najznatnije veličine, što ih ispituje meteorologija: to je nauka o fizikalnim pojavima atmosfere (naziv „meteorologija" prema grčkom μετέωρον, što visoko lebdi). Tlak se uzduha neprestance mijenja. Najprije se u tropskim krajevima opazilo, da u tim promjenama ima „dnevna" pravilnost. U 4 sata i u 16 sati tlak prelazi iz padanja u rastenje, a u 10 sati i u 22 sata iz rastenja u padanje. Tlak se pri tom mijenja (u tropima) za 2 do 3 mm. Što je veća geografska širina, to su manje te pravilne promjene, pa su u našim širinama često zastrte drugim promjenama tlaka. Aritmetička se sredina tlakova jednog istog sata svih dana mjeseca rujna 1904. mijenjala u Zagrebu ovako:

	4 sata	10 sati	16 sati	22 sata
najveći tlak	—	0·38 mm	—	0·28 mm iznad prosjeka
najmanji tlak	0·32 mm	—	0·35 mm	— ispod prosjeka.

Uzrok je tom mijenjanju zibanje atmosfere, koje prati prividnu vrtnju Sunca; zato se skrajnje vrijednosti tlaka javljaju svagdje otprilike u isto doba dana.

Isprva se mislilo, da je tlak uzduha na mjestima jednake geografske širine i jednake visine iznad mora poprijeko jednak. No crte izobare, što spajaju mjesta zemaljske površine, u kojima je srednja vrijednost tlaka (preračunana na površinu morsku, isp. § 93.) jednaka, ne podudaraju se sa geografskim paralelama, već su krivulje zamršenijega oblika. U srednjim je i višim geografskim širinama zimi tlak nad morem poprijeko manji, negoli nad kopnom, pa izobare slijede dosta dobro obrise kontinenata.

Gdje je na površini zemlje tlak manji, negoli igdje u susjedstvu, tamo kažemo da je barometarski minimum (lat. *najmanje*). Pri proricanju „vremena" t. j. skupa meteoroloških prilika (temperatura, vjetar, naoblaka i t. d.), što će vladati u nekom mjestu, važno je, da se pripazi, kako se kreću minima. Našlo se, da ima nekih istaknutih poteza na površini zemaljskoj, kojima se putovi minima ponajčešće prilagođuju. Zato se put nekoga minima može donekle proreći.

Na meteorološkim sinoptičkim kartama (grč. σύνοψις, *pregled*), koje se dnevice izdavaju, prikazane su zgodnim načinom meteorološke prilike, što vladaju u određeni čas dana na povećem dijelu zemaljske površine. One se prave na osnovu brzojavnog saopćivanja meteoroloških podataka.

106. Vjetar u prirodi. Vjetar je gibanje uzduha. Brzina se vjetra određuje spravom, koja se zove anemometar (grč. ἄνεμος, *vjetar*); no budući da se baš ne može ta sprava namjestiti svagdje, gdje bi trebalo, cijenimo „jakost vjetra" najčešće od oka, motreći učinak vjetra na jedra, grane i t. d. Stupnjevi se vjetra označuju u ljestvici Beaufortovoj (1805.) brojkama 0, 1, 2, . . . 12, te znači 0 tišinu, 1 neznatan vjetrić, koji čini, da dim ne ide vertikalno, 2 lak vjetar, koji lišće njiše, 3 vjetar, koji ziblje omanje grane, 4 jači vjetar, koji diže prašinu i pomiče deblje grane, 5 jak vjetar, što njiše stabla, 6 buru, koja miče najveća stabla, 7 buru, koja kida grane, 8 buru, koja kida malena stabla i oštećuje krovove, 9 orkan, koji ruši velika stabla i odnosi krovove, 10—12 vrtložni vihor, kojemu ništa ne može odoljeti.

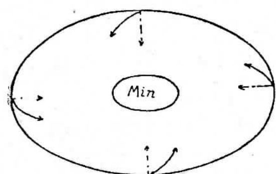
Cijenjenjem nadomješta se mjerenje i u drugim zgodama; bolje je, da se pojavi odrede makar netočno, nego nikako. Ljestvica za cijenjenje potresa (Rossi—Forel), za vrsnoću robe, za napredak učenika, ljestvica tvrdoće u rudstvu.

Jakost je vjetra iznad površine morske uopće veća negoli iznad kopna. Nad kopnom tik površine noću duva poprijeko slabiji vjetar negoli danju, a najveća je brzina koji sat iza podneva; na visokom tornju i visinama još većima vjetar je jači noću. Radi trenja i zapreka jakost je vjetra tik površine manja negoli u visini. Brzina i snaga vjetra znadu doseći velike vrijednosti; tornado u Novskoj g. 1892. bacio je željeznička kola 30 m daleko od tračnica, pa mu je brzina bila možda 100 m/sek.

Ako u dva jednako visoka mjesta površine zemaljske vlada različit tlak, jači tlak nastoji tjerati uzduh prema mjestu slabijega tlaka. Sila, kojom razlika tlakova djeluje na uzduh, okomita je na izobari. Ta je sila to jača, što je veća razlika tlakova. Na mjestu, gdje su dvije izobare bliže jedna

drugoj, sila je veća, negoli tamo, gdje su iste te izobare više razmaknute. Osim razlike tlakova djeluje na uzduh još težina njegova, no ona ne utječe neposredno na jakost horizontalnoga vjetra. Najposlije djeluje i trenje između uzduha i površine zemaljske. Smjer se gibanja tijela doduše ne mora podudarati sa smjerom sile, nego može biti i protivan, no jedva će biti primjera, da bi vjetar duvao k mjestu većega tlaka; znajući dakle razdiobu tlakova upoznali smo, što je najvažnije za određivanje smjera vjetra.

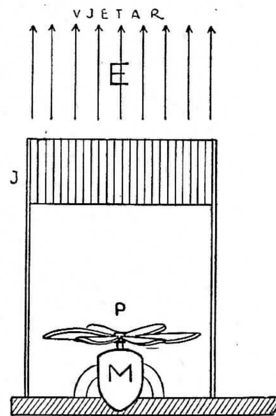
Na smjer vjetra znatno utječe vrtnja zemaljska. Da nema te vrtnje, vjetar bi išao o k o m i t o na izobaru prema izobari manjega tlaka, no radi vrtnje zemaljske vjetar se vazda skreće iz toga smjera. U sl. 112. shematično su predočeni smjerovi vjetra oko minima na sjevernoj poluci; krivulje označuju izobare, crtkane strelice smjer vjetra, kakav bi bio, da se Zemlja ne vrti, izvučene strelice pravi smjer vjetra. Kada nam n a s j e v e r n o j p o l u c i vjetar duva u leđa, p o d r u č j e j e n i s k o g a t l a k a s l i j e v e s t r a n e (B u y s B a l l o t 1857.). Da upamtimo, kako valja nacrtati sl. 112., zaključivat ćemo ovako: kad bi tlakovi tjerali uzduh od juga prema sjeveru, uzduh dolazi u krajeve manje brzine, pa poradi brzine, kojom je pratio gibanje Zemlje, preteče površinu zemaljsku, dakle skrene prema istoku; umjesto južnjaka nastaje jugozapadnjak (H a d l e y 1735.).



Sl. 112.

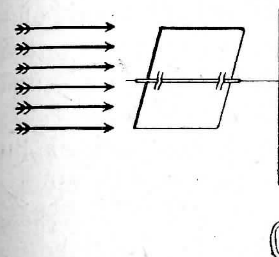
Zad. **76.** Kako se u točki sjeverne polutke mijenja smjer vjetra, ako sjeverno od te točke prijeđe minimum od zapada prema istoku?

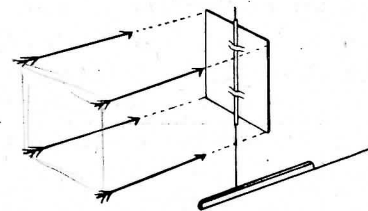
107. Pokusi s umjetnim vjetrom. Umjetni vjetar, kakav treba za aerodinamske pokuse, treba da je u širokom prosjeku što jednoličniji, t. j. brzine treba da su posvuda u vjetru jednake i usporedne. Vjetar, što ga stvara vrtnja propelera, nema tog svojstva, jer u tom vjetru osim gibanja u smjeru osi propelera postoji još i r o t a c i j a ili vrtložnost zraka. A p a r a t z a v j e t a r (sl. 113.) ima zato osim motora *M* i propelera *P* još i „i s p r a v l j a č“ *I.* Propeler stvara vjetar i goni ga kroz ispravljač, koji je razdijeljen u duguljaste, usporedne stanice (poput pčelinjeg saća), te navraća struju zraka svuda u isti smjer, tako da u prostor *E*, gdje se eksperimentira, ulazi vjetar bez rotacije. (Za ispitivanje aeroplana grade goleme a e r o d i n a m s k e „k a n a l e“, gdje je struja vjetra nekoliko metara široka.)



Sl. 113.

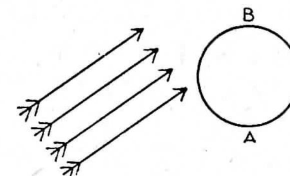
I s p i t i v a č v r t l o ž n o s t i (Sl. 114.) jest ravna limena pločica, koja se može vrtjeti oko osi, koja leži u samoj pločici. Os se namjesti u smjer vjetra. U vjetru, koji je pravilan, pločica se n e v r t i. D v o ř á k o v a p l o č a (Sl. 115.) Namjestimo spomenuti ispitivač tako da mu je os okomita na smjeru vjetra. Pločica se postavlja o k o m i t o na smjer vjetra, a ne usporedno, kako bi se moglo očekivati. Taj pojav otkrio je D v o ř á k; v. u akustici.


Sl. 114.


Sl. 115.

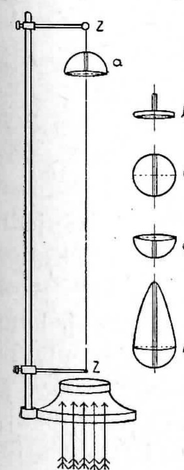
A u t o r o t a c i j a. Ako u pređašnjemu pokusu pločicu udarimo, nastaje vrtnja, koja n e ć e p r e s t a t i, premda s obzirom na simetriju toga ne očekujemo. Očito je sama vrtnja razlog, da sile, koje djeluju na jedno i drugo krilo pločice, nisu jednake. Pojav se zove autorotacija. Prema udarcu rotacija ide u jednom ili drugom smislu.

Laka kugla moža v i s j e t i na struji zraka. Na vjetru, koji ide vertikalno u vis, kugla može lebdjeti („plesati“). Ako smjer vjetra priklonimo spram vertikale, kugla ne treba pasti (sl. 116.). U području *A* ispod kugle brzina je vjetra manja nego li u *B*, iznad kugle. Zato je kod *A* tlak veći nego li kod *B*, te razlika tlakova može svladati težinu kugle. (Isp. Magnusov pojav § 104.)



Sl. 116.

P r i t i s a k v j e t r a (o t p o r z r a k a). Upravimo vjetar vertikalno u vis. U vjetar stavimo nategnutu vertikalnu žicu ZZ (sl. 117.), na kojoj se može sklizati probušeno tijelo, koje ispitujemo. Ako tijelo nije preteško, vjetar ga diže, pa kako je u visini vjetar sporiji, tijelo se zaustavlja na takvoj visini, gdje je p r i t i s a k vjetra jednak težini tijela. Tu silu možemo shvatiti i kao o t p o r zraka, jer kada ne bi bilo vjetra, tijelo bi j e d n o l i k o padalo brzinom jednakom i protivnom onoj, koju je vjetar imao, te bi težini tijela držala ravnotežu sila, kojom se zrak odupire gibanju tijela.

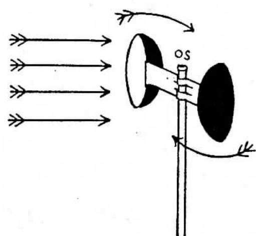


Sl. 117.

Pritisak vertikalnog vjetra na tjelesa, koja imadu najveći svoj horizontalni prorez j e d n a k, za različita je tjelesa r a z l i č i t i stoji do oblika tijela. Osobito je velik za šuplju polukuglu *a,* koja ima svoju konkavnu

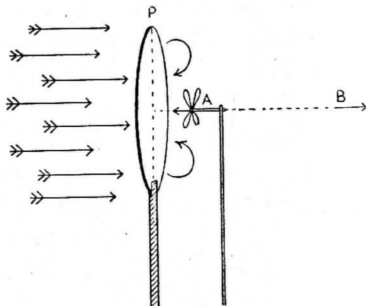
stranu okrenutu prema vjetru; ona se diže u vjetru do veće visine nego li horizontalna okrugla ploča *b* jednakog promjera i jednake težine. Ta opet ide više nego li kugla *c* jednakoga promjera i težine. Još je manji pritisak na šuplju polukuglu *d* konveksnu prema vjetru, a najmanji je otpor za t. zv. aerodinamsko tijelo *e*, koje je prema vjetru okrenuto oblom površinom, dok se u zavjetrini suzuje u šiljak („oblik ribe", „oblik kapi, koja pada").

Anemometar. Na tome, da vjetar jače pritiskuje konkavnu šuplju polukuglu nego li konveksnu, osniva se konstrukcija anemometra, što ga je izumio Robinson (g. 1846.). Oko vertikalne osi (sl. 118.) učvršćene su bar dvije jednake šuplje polukugle, tako da je krug svake polukugle vertikalan a konveksne strane polukugala okrenute su „u istom smislu". U vjetru aparat se vrti i to tako, da konveksne strane idu naprijed. Što je vjetar jači, to je vrtnja brža. Treba dakle naročitim brojilom i urom odrediti brzinu vrtnje, iz čega onda izlazi brzina vjetra.



Sl. 118

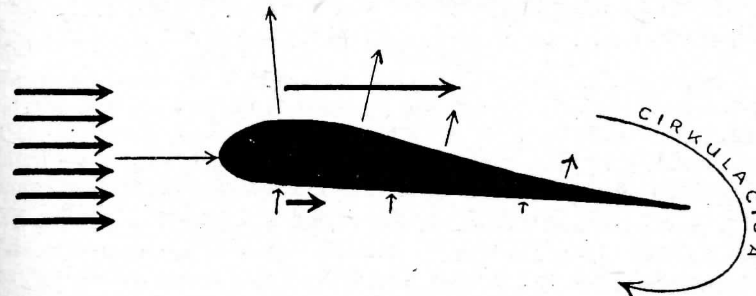
Otpor i vrtlozi. Kada kruto tijelo držimo u vjetru ili u struji vode, redovno se iza tijela stvaraju vrtlozi. Tako ako je okrugla ploča *P* okomita na vjetar (sl. 119.), bit će iza ploče u simetrali njezinoj u bližim točkama *A* struja uperena prema ploči, a tek u udaljenijim mjestima *B* dobiva prvobitni smjer. To se pokazuje vunenim vlaknima, koja u *A* lepršе prema ploči, ili malenom vjetrenjačom, koja se u *A* vrti obrnutim smjerom nego li u *B*. To strujanje protiv vjetra u točkama *A* upućuje, da iza ploče postoji vrtložno gibanje. U crtnji su ti vrtlozi natuknuti svinutim strelicama. — Kada se vrtlog jače razvije, otkine se i odlazi s vjetrom, te se stvara drugi. Vrtlozi stvaraju se trenjem (i uništavaju se trenjem), pri čemu se vrši radnja. Za radnju treba sila, te različit otpor raznih tjelesa dolazi baš od tuda, što je iza jednih vrtložno gibanje jače, iza drugih slabije; iza aerodinamskoga tijela nema vrtloga, te se struja obišavši tijelo glatko sklapa.



Sl. 119.

Krilo aeroplana, prikazano u slici 120. u prorezu (sa strane gledano!), radi aerodinamskoga oblika stavlja samo malen otpor. Ako je zgodno priklonjeno spram horizontale, u glavnom se iza njega ne stvaraju vrtlozi. Ponešto svinuti oblik proreza, koji je prema gore konveksan, čini, da je relativni vjetar iznad krila jači nego li ispod krila (debele strelice). U svezi s time — kao kod Magnusova pojava — tlakovi su na gornjoj strani manji i zato

aeroplan ne pada. Tanka strelica uperena prema točki krila pokazuje, za koliko je u toj točki tlak veći od srednjega tlaka; strelica, koja izlazi iz točke



Sl. 120.

krila, upućuje, da je u toj točki tlak snižen. Mjerenja pokazuju, da su sniženja tlaka iznad krila popreko veća nego li povišice ispod krila, tako da krilo više visi na gornjem zraku nego li što ga nosi zrak, koji je odozdo. Kao kod Magnusova pojava može se i ovdje uzeti, da je općoj struji vjetra superponirana cirkulacija zraka oko krila (svinuta strelica). Dok kod Magnusova pojava cirkulaciju stvaramo vrtnjom rotora, ovdje ona nastaje automatično poradi osobita oblika i namještaja krila.

5. Dodaci k mehanici

108. Elastičnost. U §§ 29 i 30. reklo se, šta su to neelastična tjelesa i šta elastična; sada će se ispitati, koji je zakon elastičnosti čvrstih tjelesa.

Ako bakrenu žicu dužine 100 cm i proreza 1 mm² opteretimo utezom 10 kg*, žica se produži za 1 mm. Ako na istu žicu objesimo utez 5, 15, 20 kg*, produženje je 0·5, 1·5, 2 mm. Dakle je produženje razmjerno teretu (Hooke 1687.). — Žicu dugu 200 cm produžit će utez 10 kg* 2 puta toliko koliko žicu dužine 100 cm, t. j. za 2 mm, jer će svaku polovicu žice produžiti za 1 mm. Produženje je razmjerno dužini. — Ako je prorez žice 2 mm², možemo je u misli rascijepati u dvije usporedne žice, kojih svaka nosi polovicu tereta; dakle ako je žica proreza 2 mm² i dužine 100 cm opterećena sa 10 kg*, produženje bit će 0·5 mm. Produženje je obrnuto razmjerno prorezu. — Ako je l cm dužina bakrene žice, Δl cm produženje, σ mm² prorez žice, Q kg* opterećenje, svi su spomenuti primjeri dani formulom

$$\Delta l = \frac{1}{10000} \cdot \frac{l\,Q}{\sigma}.$$

Nazivnik 10000 u toj formuli zove se modul elastičnosti bakra (lat. *modulus, mjera*); za žice ili štapove od drugih tvari vrijede slične formule, tek je modul elastičnosti drugi.

Treba napomenuti, da razmjernost produženja s teretom ne vrijedi, ako su tereti preveliki, a ima nekih tvari, na pr. liveno željezo, za koje ne vrijedi ni kod najmanjih tereta.

Primjer elastičnog izobličenja ili deformacije (lat. *deformatio*), što ga ispitasmo, ide među najjednostavnije. I kod zamršenijih primjera vrijedi, da 2-strukoj, 3-strukoj . . . sili pripada 2-struko, 3-struko . . . izobličenje.

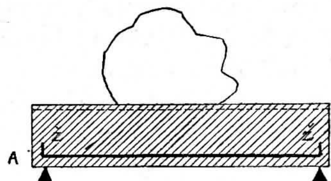
Točnije istraživanje pokazuje, da deformacija nekoga tijela nije određena samo silama, koje u dani čas na nj djeluju, nego cijelom prošlošću tijela. Kad prestane djelovati sila, koja je elastično tijelo izobličila, tijelo se ne vrati odmah u svoj prvotni oblik. Utjecaj je negdašnjega izobličenja to jači, što je veće bilo izobličenje, što je dulje ono trajalo i što je manje vremena od njega prošlo. Zorno kažemo, da se tvar vlada kanda ima „pamćenje".

Zad. 77. Ravna horizontalna bakrena žica duga 1 m s prorezom 1 mm² i modulom 10000 učvršćena je bez napetosti u krajnjim točkama. Koliko se spusti sredina žice, ako u sredini objesimo utez 0·5 kg? kolikom se silom pri tom žica napne? (Isp. zad. 2.)

[za 1·8 cm; 6·8 kg*]

109. Čvrstoća. Ako na vertikalan štap objesimo pretežak utez, štap će se rastrgati. Ako tome dostaje baš utez Q kg*, kažemo, da toliko iznosi čvrstoća u natezanju. Štapovi od čelika sa prorezom 1 cm² imadu $Q = 3500$ do 14000 kg*. — Ako se vertikalan stup odozgo optereti prevelikim teretom, smrvit će se. Opterećenje, koje tome treba, mjera je za čvrstoću u tlačenju. Kod željeznih je štapova jedna čvrstoća otprilike jednaka drugoj; kod drvenih štapova (usporednih sa vlaknima) čvrstoća je u natezanju veća negoli u tlačenju; obrnuto vrijedi za beton, koji podnosi 10 puta jače tlačenje negoli natezanje. Čvrstoća betona raste kroz nekoliko godina iza kako je beton načinjen. — Od čvrstoće u tlačenju treba razlikovati čvrstoću uspravnosti. Ako kratak vertikalan štap, koji je odozgo opterećen, zamijenimo predugačkim štapom iste tvari i jednakoga proreza, čvrstoća u tlačenju ne će se promijeniti, ali štap će „klonuti", t. j. on će se zbog kojegod neznatne nejednakosti tereta, koje i ne primjećujemo, svinuti.

Ako se horizontalna greda AB (sl. 121.), koja je na krajevima poduprta, u sredini optereti, svinut će se tako, da se sredina spusti. U misli može se greda rastaviti u štapove paralelne dužini njezinoj. Kad se greda svine, gornji se štapovi skrate, donji produže; u gornjima vlada tlak, u donjima natezanje. Ako je greda od betona, velik je nerazmjer među čvrstoćom natezanja donjih štapova i čvrstoćom u tlačenju gornjih štapova; donji dijelovi već pucaju, dok čvrstoća gornjih dijelova nije ni izdaleka iscrpljena. No ako se u donji dio grede uloži željezo $ŽŽ$, čvrstoća se donjega dijela primjereno poveća („armirani beton"; izumio ga vrtlar Monnier 1867.).



Sl. 121.

Račun pokazuje, da se čvrstoća posude protiv unutarnjega tlaka ne može ojačavanjem stijena povisiti iznad neke granice. Čvrstoću topovskih cijevi jačaju tako, da preko cijevi prevuku kovni plašt visoke temperature; kad se plašt ohladi, stisne cijev, te u njezinoj stijeni vladaju tlakovi; kad se top ispali, tlak od eksplozije nastoji da rastegne cijev; no natezanje nastaje tekar onda, kad je tlak eksplozije dosta jak, da se njime uništi prvobitni tlak u stijeni; prema tome najveće natezanje ne će biti toliko, koliko bi bilo, da nema plašta.

Napetost se pojedinih dijelova stroja, mosta i t. d. bilo pravilno bilo nepravilno mijenja. Iskustvo pokazuje, da je u tim primjerima čvrstoća manja, nego što bi bila kod stalnoga opterećivanja.

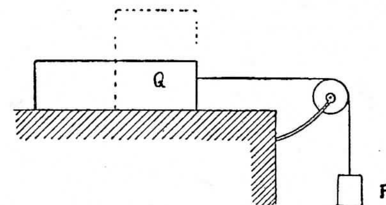
Ako tijelo A može ozlijediti površinu tijela B, a samo ostane neoštećeno, tijelo je A „tvrđe" od tijela B. Tvrdoća je čvrstoća površine. Tvrdoća tijela, koje nije tvrđe od čelika, često se određuje tako, da se na tijelo određenim tlakom pritisne čelična kugla određene veličine; kad se kugla ukloni, preostao je na tijelu okrugao trag tlačenja; uzimlje se, da je tvrdoća obrnuto razmjerna površini toga traga. (Brinell, 1903.) Kojagod uredba za mjerenje tvrdoće zove se sklerometar (grč. σκληρός, *tvrd*).

T. zv. bolonjsku bočicu (17. vijek) možemo baciti na tle, dosta jako udarati, tresti u njoj čavle, pa se ipak ne će razbiti; spusti li se u bočicu sitan komadić kremena, odmah se ona rasprsne. Kad se bočica pravila, staklo se naglo ohladilo, a u takvom staklu vlada napetost; kremen ozlijedi površinu stakla, te napetost površine ne može više svladati unutarnju napetost stakla.

Zad. 78. Olovna žica obješena na jednom kraju rastrgne se, ako je dulja od 175 m; kolik teret može nositi kratka olovna žica s prorezom 3 mm², ako je specifična težina olova 11·3 g*/cm³?

[5·9 kg*]

110. Trenje. Na horizontalnoj daski neka leži na pr. drven paralelepiped, na koji je privezan horizontalan konac, koji ide preko koloture, pa se nateže utezima (sl. 122.). Malen utez ne će paralelepipeda pokrenuti jer smeta trenje, što postoji između paralelepipeda i daske. Ako se utez povećava, doći će se do uteza P, koji je nuždan za svladanje trenja, te je mjera trenja. Ako se paralelepiped optereti sve većim teretima, postat će i trenje sve veće, pa će trebat sve veći utez P. Mjerenje pokazuje, da je trenje P približno razmjerno težini Q opterećenoga tijela; ako se dakle tijelo opterećeno do ukupne težine 200 g* pokrene silom 80 g*, isto će se tijelo opterećeno do 400 g* pokrenuti silom 160 g*, a kod težine 600 g* bit će trenje 240 g*. Stalni omjer trenja P i pritiska Q, kojim se tlače plohe, što se taru, zove se koeficijent trenja; ako ga bilježimo sa μ, zakon trenja glasi



Sl. 122.

$$P : Q = \mu.$$

U spomenutom je primjeru $\mu = 80 : 200 = 0{\cdot}4$. Vrijednost μ zavisi o tome, koje se tvari taru jedna o drugu i kakve su im površine.

Ako dio paralelepipeda odrežemo, tako da se tiče daske samo na polovici plohe, pa odrezani dio natovarimo na ostatak tijela, trenje se ne će promijeniti; u jednu je ruku trenje spalo na polovicu, jer se dodirna ploha u tom omjeru smanjila, ali u drugu je ruku pritisak na taj dio plohe sada dvostruk, što podvostručuje trenje. Trenje ne stoji do veličine dodirne plohe (Leon. da Vinci).

Ako hoćemo, da se tijelo stalnom brzinom skliže na horizontalnoj daski, treba ga vući stalnom silom, koja je jednaka trenju. Odavna je poznato, da za ovo gibanje dostaje manja sila, nego što je sila, koju treba primijeniti, da mirno tijelo pokrenemo. Trenje u gibanju manje je od trenja u mirovanju.

Brzina kotača, koji se kotrlja na horizontalnoj podlozi, umanjuje se, jer na nj djeluje trenje u kotrljanju. To je trenje maleno, pa ćemo tešku gredu laglje otpremiti na drugo mjesto, ako podmetnemo valjak, te je otkotrljamo, negoli ako je skližemo na tlima. Na tom se i osniva izum kôlâ; gdje se kotači tiču tla, djeluje trenje u kotrljanju; imamo doduše i kod kola trenje u sklizanju i to u ležajima, t. j. gdje se os tiče glavčine kotača, no to se trenje mazanjem znatno obaljuje. Međutim, da i na tom mjestu sklizanje zamijenimo kotrljanjem, umeću se između osi i glavčine čelične kugle (ležaj s kuglama 1845.). — Zakone je trenja potanje ispitao Coulomb 1785.

Zad. 79. Neko tijelo može mirovati na kosini, samo ako priklon kosine nije veći od α („kut trenja"!); kolik je koeficijent trenja? [$tg\ \alpha$]

II. TOPLINA

111. Pojam temperature. Oćuti označeni riječima „studeno", „toplo", „vruće" i t. d. zovu se oćuti topline. Fizikalno stanje našega okoliša, koje te oćute izazivlje, zove se stupanj topline ili temperatura (lat. *temperatura, prava mjera, umjera*). Sprave, kojima se mjere temperature, zovu se termometri (grč. θερμός, *topao*) ili toplomjeri.

Ako se vruće tijelo dotiče studenoga ili mu je bar blizu, oćuti se topline, što ih u nama pobuđuju, sve više zbližuju. Vruće se tijelo „ohlađuje", studeno „ugrijava", „toplina prelazi" iz vrućega tijela u studeno, dok nam se najposlije ne pričinja, da su oba tijela iste temperature. Mjerenje temperature osniva se na uvjerenju, da termometar stavljen u prostor, kojemu hoćemo odrediti temperaturu, poprima nakon nekoga vremena temperaturu, što je ima ispitivani prostor.

Od termometara je najpoznatiji živin termometar. Uska, staklena zatvorena cijev proširena je na jednom kraju u „posudicu"; u posudici i u dijelu cijevi jest tekuća živa, a u preostalom dijelu cijevi živine pare. Ako se temperatura „povisuje", t. j. ako postaje toplije, tekuća živa ispunja sve veći dio cijevi, te prema dužini stupca žive nalazimo temperaturu. Uz cijev živina termometra nalaze se naime crtice temperaturne skale ili ljestvice. Kod t. zv. Celsius-ove ili Celzijeve ljestvice označuje se temperatura, kod koje se led tali (kod tlaka 760 mm), brojem 0, a temperatura, što je imaju vodene pare iznad vode, koja vri (kod tlaka 760 mm), brojem 100. Te se temperature zovu ledište ili točka leda i vrelište ili točka para. Jedinica, kojom se mjeri temperatura, zove se stupanj i bilježi znakom ^{0}, kod Celzijeve ljestvice jasnije znakom ^{0}C, tako da u toj ljestvici spomenute osnovne točke bilježimo 0^0C i 100^0C. — Crtice, koje odgovaraju tima dvjema temperaturama, prve se načine. Iza toga se kod jevtinih živinih termometara razdijeli razmak između ledišta i vrelišta na 100 jednakih(!) dijelova i ta razdioba možda i nastavi iznad temperature 100^0C i ispod temperature 0^0C (negativne temperature!). Tako se na priprost način dobije razdioba, koja se međutim slabo podudara sa znanstvenom temperaturnom skalom, te se ne može upotrijebiti kod točnijih mjerenja.

Toj se razdiobi može naime štošta prigovoriti. Stanje žive u termometru stoji do rastezanja žive, ali i do rastezanja stakla. Ako se načine dva termometra, koji su koliko je moguće jednaki, ali su od različitih vrsti stakla, podaci će se termometara razilaziti, jer promjena temperature na različite vrsti stakla nejednako djeluje. Ne vidimo, kojemu termometru treba dati prednost. U drugu je ruku samovoljno, što ljestvicu temperature određujemo oslanjajući se baš na promjene obujma; s istim bi se pravom ljestvica temperature mogla dovesti u svezu sa kojom drugom fizikalnom promjenom, što nastaje promjenom temperature. — Od tih je prigovora prosta „termodinamička" ljestvica temperature (W. Thomson = Lord Kervin, 1848.), koja se osniva na teoriji topline (termodinamika), a donekle će se objasniti u § 130. Ona je međunarodnim sporazumom posvuda prihvaćena, te je kod boljih živinih termometara razdioba načinjena u skladu sa termodinamičkom ljestvicom; dužina stupnja kod jednog te istog termometra u tom slučaju dakle nije posvuda jednaka.

Ljestvica živina termometra vrijedi uz pretpostavu, da je termometar sasvim uronio, u prostor, kojemu hoćemo odrediti temperaturu; ili treba da je uronio, dokle seže stupac tekuće žive. Često ne možemo tome zahtjevu udovoljiti; onda je komadić živinog stupca u drugoj temperaturi, nego što je temperatura, koju mjerimo, pa treba pogrešku, koja otuda nastaje, popraviti. Kod mjerenja viših temperatura znade tako nastati pogreška od nekoliko stupnjeva.

Ima živinih termometara, kojima ljestvica seže do iznad 500° C; u njima je iznad tekuće žive dušik, argon i t. d. visokoga tlaka; svrha je toga, da se spriječi naglo i nepravilno isparivanje žive. — Ima termometara, kod kojih je živa zamijenjena drugom tekućinom. Kod temperatura, kod kojih je živa smrznuta (ispod —39° C), upotrebljava se na pr. termometar punjen sa pentanom, koji može služiti do —190° C.

Od definicije termodinamičke skale do samoga mjerenja prema toj skali dalek je put. Istraživanja izvedena u velikim državnim fizikalnim zavodima (Charlottenburg u Njemačkoj, Teddington u Velikoj Britaniji, Washington u Saveznim Državama) najposlije su dovela do toga, da se mogla uvesti g. 1927. međunarodna ljestvica temperatura. Njezina definicija sadržana je u nizu naputaka, kako se mogu jednostavnijim postupcima određivati temperature u što boljem skladu s termodinamičkom ljestvicom. Prema tima napucima temperature između 0° C i 660° C mjere se platinenim termometrom, t. j. platinenom žicom, za koju se određuje, koliki joj je otpor električkoj struji, i otuda računom nalazi temperatura. Istim termometrom, ali ponešto drugim računom određuju se temperature između —190° C i 0° C. Za temperature od 660° C do 1063° C služi kao termometar termočlanak, kojemu se mjeri elektromotorna sila. Iznad 1063° C određuju se temperature time, da se ispituje žar t. zv. crnog tijela. Uz spomenute već osnovne točke važne su za baždarenje spomenutih aparata ove temperature: vrelište kisika —182·97° C, vrelište sumpora 444·60° C, talište srebra 960·5° C i talište zlata 1063° C (sve kod tlaka 760 mm).

Uz Celsiusovu se ljestvicu još upotrebljava Fahrenheitova (F). Ako je temperatura

$$x^0\ C,\ z^0\ F,$$

vrijedi jednadžba

$$z = 32 + 1{\cdot}8\,x,$$

te je 0° C isto što 32° F, 100° C isto što 212° F. Jedinice za porast temperature stoje dakle u ovom snošaju:

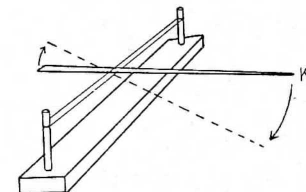
$$1\ \text{stup C} = 1{\cdot}8\ \text{stup F.}$$

Starija povijest termometra. Promjenom temperature osobito znatno mijenjaju obujam plinovi, pa se prvi termometri osnivahu na rastezanju uzduha. Načiniše ih Galilei liječnik Sanctorius i drugi početkom 17. vijeka; oni se ne razlikovahu mnogo od sprave, koju je složio Filon (Φίλων, 2. vijek pr. Kr) — dakako bez namjere, da mjeri temperaturu. Ti su termometri bili otvoreni. Još u 17. vijeku stadoše praviti termometre, u kojima se rasteže alkohol, a onda živa u sasvim zatvorenoj posudi. Amontons ispituje (1703.) mijenjanje temperature na taj način, da motri promjenu tlaka plina. — Ledište vode predložio je za osnovnu točku Hooke (1664.), vrelište Huygens (1665.). Ljestvice Fahrenheitova, Réaumurova i Celsiusova redom su nastale u 1. polovici 18. vijeka; Celsius označio je ledište sa 100, vrelište sa 0, a današnje oznake uveo je Linné.

Zad. 80. Kojim je stupnjem Celsiusove ljestvice izražena temperatura 0° F? kojim 100° F?

Zad. 81. Koja je temperatura dana jednakim brojem u Celsiusovoj i u Fahrenheitovoj ljestvici?

112. Rastezanje čvrstih tjelesa. Ako štap ili žicu od kojegod tvari ugrijemo, gotovo uvijek se rastežu. Ovo neznatno rastezanje može se raznim načinom pokazati. Kod spravice prikazane u sl. 123. razapete su dvije paralelne žice u istoj horizontalnoj ravnini u razmaku od nekoliko mm; žice nose laku drvenu kazaljku, koja je na žicama okomita, a prolazi ispod jedne i iznad druge žice. Ako žice makar samo malko ugrijemo gorućom šibicom ili električnom strujom, kazaljka će se zbog rastezanja žica znatno prikloniti. Kod naučnih mjerenja treba udesiti, da cio štap, kojemu određujemo rastezanje, bude u jednakoj temperaturi; treba ga dakle staviti u „kupelj", koja se dobro miješa.



Sl. 123.

Kako zavisi dužina štapa o temperaturi? Ako dva željezna štapa s dužinama 1 m i 2 m za jednako ugrijemo, produženje će duljega štapa biti 2 puta veće od produženja kraćega; produženje je razmjerno dužini. Vrlo često vrijedi bar približno, da 2-struk porast temperature izvodi 2-struko produženje, te je produženje razmjerno porastu temperature. Ako je

kod τ^0C dužina štapa λ cm,

kod t^0C l cm,

porast je temperature $t-\tau$, a produženje $l-\lambda$, pa se spomenute razmjernosti izražavaju formulom $l-\lambda = \alpha . \lambda . (t-\tau)$ ili

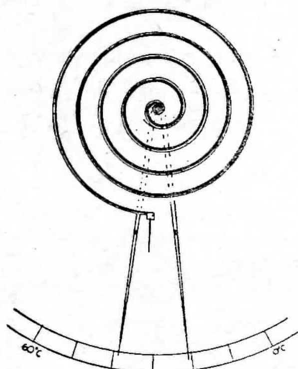
$$l = \lambda\,(1 + \alpha\,[t-\tau]).$$

Konstanta razmjernosti α zove se koeficijent rastezanja kod temperature τ. Ako štap dužine 1 cm ugrijemo za 1°, štap se produži za α cm.— Ako se temperature t nanesu kao apscise koordinatnoga sustava, a dužine l kao ordinate, zakon je rastezanja predočen pravcem. U prvi mah razabiramo, da taj zakon ne može vrijediti za sve temperature; pravac zgađa os apscisa, ima njegovih točaka i s negativnim ordinatama, dok dužina štapa ne može biti ni = 0 ni negativna.

Ako odaberemo $\tau = 0$, zakon je rastezanja $l = \lambda\,(1 + a\,t)$. Koeficijent je rastezanja kod običnih temperatura za žutu mjed 0·000019 = 19×10^{-6}, za željezo 11×10^{-6}, za invar (lat. *in*, niječna čestica; *varius, promjenljiv*), slitinu od niklja (36%) i željeza (Guillaume 1899.) samo $0{\cdot}8 \times 10^{-6}$, za amorfni kvarc $0{\cdot}5 \times 10^{-6}$. Invar se radi neznatnoga rastezanja upotrebljava za mjerila. Štap od kvarca imade kod —80° C najmanju dužinu; ako ga ohlađujemo ispod te temperature, ne će se stezati, već rastezati.

Kod točnijega opisivanja rastezanja trebaju zamršenije formule, pa je na pr. dužina štapa platinenoga između temperatura —190° C i + 100° C vrlo dobro dana formulom $l = \lambda\,(1 + 0{\cdot}000008615\,t + 0{\cdot}0000000370\,t^2)$.

Ako se dvije pruge različitih koeficijenata rastezanja usporedno jedna uz drugu učvrste, dobivena se dvostruka pruga grijanjem savija. To se upotrebljava kod kovnoga termometra (Breguetova spirala, 1817.). Sl. 124 prikazuje kovni „maksimum-minimum"-termometar. — Kompenzacija kod ure. — Ako mijenjamo temperaturu štapa, kojemu su krajevi dobro učvršćeni, nastaju u štapu napetosti. To vrijedi za tramvajsku tračnicu, koja je svarivanjem sastavljena, te duž cijele tramvajske pruge čini samo jedan komad. — Isto tako porode se napetosti u krutom tijelu, ako mu dijelove nejednako ugrijemo. Ako staklo brzo ugrrijemo, temperature ne će u njem ostati posvuda jednake, nastanu napetosti, te staklo može i pući. Teže će se to dogoditi kod takvih vrsti stakla, koje imaju manji koeficijent rastezanja, na pr. kod „pireks"-stakla s koeficijentom $3{\cdot}2 \times 10^{-6}$. — Koeficijenti rastezanja betona i željeza mnogo se ne razlikuju, pa beton i u vatri dobro prianja uz željezo.



Sl. 124.

Zad. **82.** Za koliko se produži željezna tračnica duga 6 m, ako joj temperatura naraste od —20° C na +40°?

Zad. **83.** Za koliko naraste obujam kocke ugrijevanjem, ako brid naraste za 1‰? [približno za 3‰]

Zad. **84.** Za koliko naraste Eiffelov toranj u Parisu., visok 300 m, ako mu se temperatura povisi za 30°, a koeficijent je njegova rastezanja jednak kao u željeza? [10 cm]

113. Utjecaj temperature na tekućine i plinove. Tekućine se mijenjanjem temperature poprijeko jače rastežu negoli čvrsta tjelesa, a još se više rastežu plinovi. Da se voda obične temperature ugrijevanjem rasteže, posredno slijedi otuda, što se može načiniti tijelo, koje u hladnoj vodi pliva, u toploj tone (Albiruni 11. vijek); voda rastegnuvši se imade manju specifičnu težinu, te čvrsto tijelo u toploj vodi izgubi manje težine, negoli u hladnoj. Našlo se, da voda imade kod 4° C najmanji obujam (najveću gustoću) (Academia del Cimento, 17. vijek). To vrijedi kod običnoga tlaka; pod tlakom 93 atmosfere najmanji je obujam vode kod 2° C. Teška voda (§ 20.) ima najveću gustoću kod 11·6° C.

Što vrijedi za dužinu štapa (predašnji §), slično vrijedi za obujam tekućine. Porast obujma kod promjene temperature razmjeran je obujmu i često je približno razmjeran porastu temperature. Ako je

kod 0° C obujam v_0 cm³
kod t^0 C $\quad v$ cm³,

porast je obujma $v - v_0$, porast temperature t, pa je matematički oblik spomenutih razmjera $v - v = a \cdot v \cdot t$; dakle je

$$v = v_0\,(1 + a\,t).$$

Faktor a pokazuje, koliko se poveća obujam 1 cm³, ako temperatura naraste za 1°; on se zove kubički koeficijent rastezanja. Za živu je $a = 0{\cdot}00018$.

I za obujam plina vrijedi sada napisana jednadžba, i to mnogo točnije negoli za tekućine; povrh toga postoji znamenita činjenica, da je za različite plinove a malne isto t. j. $^1/_{273}$, tako da je zakon rastezanja

$$v = v_0\,(1 + \frac{1}{273}t).$$

Taj Gay-Lussac-ov zakon (poč. 19. vijeka) vrijedi uz pretpostavu, da se tlak ne mijenja (dok Boyleov zakon vrijedi, kad je temperatura stalna).

Ako znademo obujam plina kod neke temperature i tlaka, možemo na osnovu Boyleova i Gay-Lussacova zakona izračunati obujam za druge vrijednosti tlaka i temperature. Neka je

kod 0° C i tlaka p_0 din/cm² obujam v_0 cm³,
kod t^0 C i tlaka p din/cm² obujam v cm³.

Ta promjena neka je izvedena u dva maha. 1.) Tlak neka ostane p_0, a temperatura neka naraste od 0° C na t^0 C; obujam plina postaje v', pa je po Gay-Lussacovu zakonu $v' = v_0\,(1 + {}^1/_{273}\,t)$. 2.) Temperatura neka sada ostane t^0 C, a tlak neka se promijeni na vrijednost p; po Boyleovu je zakonu $p\,v = p_0 v'$. Ako se iz tih jednadžbi eliminira veličina v', koje i ne tražimo, dobiva se

$$p\,v = p_0\,v_0\,(1 + {}^1/_{273}\,t),$$

a odatle se može obujam v za svako p i t izračunati. Ta se formula zove „jednadžba plina", te su u njoj Boyleov i Gay-Lussacov zakon združeni. Ona vrijedi približno; plin, za koji bi vrijedila točno, zove se idealan.

Ako se jednadžba plina primijeni na primjere, gdje se obujam ne mijenja, te je $v = v_0$, dobiva se

$$p = p_0\,(1 + {}^1/_{273}\,t),$$

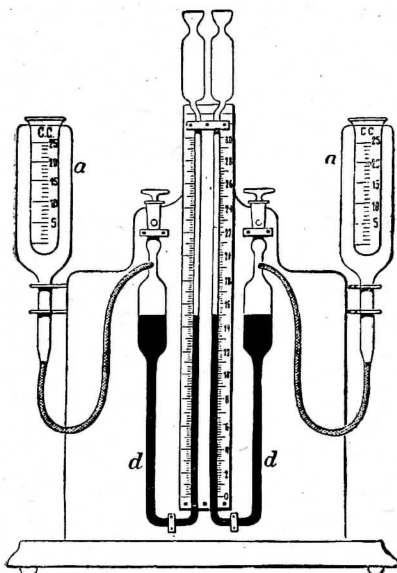
a to je Gay-Lussacov zakon o promjeni tlaka, koji kaže, kako se mijenja tlak plina, ako plin grijemo ne mijenjajući mu obujma.

Rastezanjem se plina helija mogu mjeriti još niže temperature negoli vodikovim termometrom. Vrlo visoke temperature, na pr. iznad 1000° C ne mogu se mjeriti plinskim termometrima, jer bi plinovi toliko ugrijani difundirali kroz stijene termometra.

Kod fizikalnih se pokusa mnogo upotrebljava uzdušni termoskop (grč. σκοπέω, *motrim*), koji jasno pokazuje i omanje promjene temperature, a u biti nije mnogo različan od najstarijih termometara. U sl. 125. prikazan je Looserov dvostruki termoskop; prostor se a grije, pa se poradi rastezanja uzduha pomakne tekućina u cijevi d.

Zad. 85. Obujam je plina kod 0°C 1 litra; kod koje je temperature obujam 2 litre? [273°C]

Zad. 86. Obujam je plina kod 10°C 1 litra; kod koje je temperature obujam 2 litre? [293°C]



Sl. 125.

Zad. 87. U dvorani dugoj 20 m, širokoj 12 m, visokoj 8 m ugrije se uzduh od 0°C na 15°C; koliko će se uzduha iz dvorane istisnuti? [100 m³ od 0°C]

Zad. 88. Plin zaprema kod tlaka 1 atmosfere i temperature 27°C obujam 5 litara; kolik je obujam plina pod tlakom 3 atmosfere kod temperature 100°C? [2·07 litre]

114. Apsolutna ljestvica temperature. Apsolutna je ljestvica temperature termodinamička ljestvica, koja je tako udešena, da joj je razmak ledišta i vrelišta vode 100° kao i u obične ljestvice, dok je „0" pomaknuta za 273° ispod ledišta (točnije: za 273·1°). Temperature u njoj izražene bilježe se znakom °K (prema imenu Lord Kelvin). Prema tome se

0° C podudara sa 273° K
100° C „ „ 373° K
t^0 C „ „ $T = t + 273^0$ K.

Ako se u jednadžbu plina (pređ. §) uvrsti $t = T - 273$, izlazi

$$p\,v = p_0\,v_0\,(1 + {}^1/_{273}\,[T - 273]) = \frac{p_0 v_0}{273}\,T.$$

Ako se ovdje faktor ispred T bilježi sa B, glasi jednadžba (idealnoga) plina jednostavno

$$p v = B T.$$

Kraj stalnoga je obujma tlak plina razmjeran apsolutnoj temperaturi, a pod stalnim je tlakom obujam plina razmjeran apsolutnoj temperaturi. I drugi ponajznatniji zakoni termodinamike uvođenjem apsolutne temperature postaju jednostavniji.

Razlika dviju temperatura izražena je u Celzijevoj i u apsolutnoj ljestvici istim brojem, te tomu broju kao znak stupnja dodajemo samo ° bez oznaka C ili K; pišemo na pr.: temperatura 57°C viša je od temperature 50°C za 7°.

Apsolutna je ljestvica tako određena, da je temperatura 0° K t. j. — 273° C (točnije: — 273·1° C) najniža temperatura, što se može pomisliti. Ta je temperatura apsolutna ništica.

115. Množina topline. Pojmu temperatura važnošću svojom stoji uz bok pojam množina topline ili toplina. Ako hoćemo da plamenom ugrijemo 1 kg vode od 20° C na 30° C, treba tome neko vrijeme: manje će vremena trebati, da istim plamenom jednako povisimo temperaturu vodi s masom $^1/_2$ kg. Množina topline, koju treba dovesti tvari, da je ugrijemo u određenom razmaku temperatura, razmjerna je množini te tvari. Slično vrijedi za množinu topline, koju tvari oduzimljemo kod ohlađivanja.

Da 1 kg vode ugrijemo od 20° C na 40° C, treba više topline dovesti, negoli kad grijemo od 20° C na 30° C. Približno vrijedi, da su množine dovedenih toplina jednake, ako su porasti temperatura jednaki; t. j. da se ugrije voda od 30° C na 40° C, treba toliko topline, koliko treba za ugrijevanje od 20° C 30° C. Otuda slijedi, da je dovedena toplina razmjerna porastu temperature. O tom se možemo uvjeriti, ako 1 kg vode od 20° C smiješamo s 1 kg vode od 40° C; smjesa dobiva temperaturu 30° C. Hladnije je tijelo pri tome primilo toliko topline, koliko je toplije izgubilo (Richmannovo pravilo, 1747.).

Množina topline, koju treba dovesti vodi mase 1 kg, da joj se temperatura povisi za 1°, zove se 1 kilogramkalorija i kraće kalorija (lat. *calor, toplina*). Ako se vodi mase 1 kg temperatura povisi od t^0 C na τ^0 C dakle za $(\tau - t)$ °, potrošilo se $\tau - t$ kalorija. Da se jednako povisi temperatura vode s masom M kg, treba $M \cdot (\tau - t)$ kalorija.

Manja je mjera topline gramkalorija = 0·001 kilogramkalorije. Budući da kod raznih temperatura treba ponešto različita množina topline, da se 1 kg vode ugrije za 1°, određuje se točnije, da je jedinica topline 1 $kgkal_{15}$, t. j. ona toplina, kojom se ugrije 1 kg vode od $14^1/_2$ na $15^1/_2{}^0$ C.

Zad. 89. Kolika temperatura izlazi, ako se smiješaju 2 kg vode od 20° C sa 3 kg vode od 80° C? [56° C]

1 kg vode teže se grije, negoli 1 kg terpentina, 1 kg željeza itd. Ako treba masi 1 kg neke tvari dovesti c kgkal, da temperaturu povisimo za 1°, velimo, da je specifična toplina te tvari c. Specifična je toplina vode = 1. Da masu M kod neke tvari, koja ima specifičnu toplinu c, ugrijemo od t ° C na τ ° C, treba toplina

$$Q = c\,M\,(\tau - t).$$

Kako se određuje c, neka pokaže primjer. U 2 kg vode od 20° C stavimo 3 kg željeza od 80° C. Nakon nekog vremena voda i željezo imadu zajedničku temperaturu 28° C. Voda je dakleprimi la $2 \times (28-20) = 16$ kal, dok je željezo izgubilo $3 \cdot c \cdot (80-28) = 156\,c$ kal. Prema Richmannovu je pravilu $156\,c = 16$, dakle je specifična toplina željeza $c = 16 : 156 = 0{\cdot}1$.

Znajući specifičnu toplinu možemo unapred izračunati temperaturu, koja nastaje miješanjem ili doticanjem tjelesa. Na pr. specifična je toplina olova 0·03; ako bacimo 5 kg olova temperature 1000° C u 2 kg vode od 17° C,

konačna se temperatura x nađe ovako. Temperatura je olova spala za $(100 - x)^0$, pa je olovo izgubilo $0·03 \cdot 5 \cdot (100-x)$ kal; temperatura vode narasla je za $(x-17)^0$, dakle je voda dobila $2 \cdot (x - 17)$ kal. Izjednačenje toplina daje $0·03 \cdot 5 \cdot (100 - x) = 2 \cdot (x - 17)$, a odatle slijedi $x = 23^0$ C.

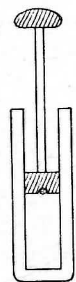
Mjerenjem topline bavi se kalorimetrija; posude ili sprave, koje služe tome poslu, zovu se kalorimetri. Ovdje su spomenuti samo prvi osnovi kalorimetrije. Kad se vruće tijelo baci u hladnu vodu kalorimetra, ugrije se i kalorimetar, pa treba uračunati i toplinu, što je primi kalorimetar. Ako je kalorimetar topliji od okoliša, gubi se za vrijeme pokusa toplina iz kalorimetra, pa treba i na taj gubitak pripaziti.

Kalorimetriju osnovao je Black sredinom 18. vijeka. — Izradba gornjih primjera osniva se na pomisli, kanda je toplina nešta nerazoriva; koliko je topline jedno tijelo izgubilo, toliko je drugo primilo. Kako i množinu tvari smatrahu nerazorivom, zaveli su prvi uspjesi kalorimetrije na mišljenje, da je toplina tvar. Kad tijelo grijemo, ta tobožnja tvar ulazi u šupljinu među molekulama tijela. Za toplinsku tvar trebalo je uzeti, da ili nema težine, ili je veoma laka, jer se nije moglo naći, da bi tijelo ugrijevanjem postalo teže. Predsuda o nerazorivosti topline silom se uvlačila i u tumačenje onakvih pojava, kod kojih nikako nije pristajala.

Voda imade gotovo od svih tvari najveću specifičnu toplinu (izuzetak je tekući vodik). Ta je činjenica znatna za tumačenje geofizikalnih pojava, te na pr. objašnjava, zašto u primorskim krajevima ujutro duva vjetar prema kopnu s mora, a podvečer obrnutim smjerom. Sunčani traci brže ugrijavaju kopno negoli more; uzduh se nad kopnom poradi rastezanja digne, te u visokim slojevima iznad kopna zavlada veći tlak negoli u jednakoj visini iznad mora; u visini dakle uzduh struji prema moru, time tlak uzduha nad kopnom bude manji negoli nad morem, pa tik površine nastane vjetar od mora prema kopnu. Obrnuto biva kod večernjega ohlađivanja.

Zad. 90. Platinena se kugla mase 100 g izvadila iz peći i bacila u 1 kg vode od 9^0C, pa je temperatura vode narasla na 13^0C; kolika je temperatura u peći, ako je specifična toplina platine 0·037?]1081°C]

Zad. 91. Plinska peć ugrije 3 hl vode od 12^0C na 32^0C, a pri tom izgori 1·2 m³ plina; koliko se topline dobije izgaranjem 1 m³ plina? [5000 kgkal]



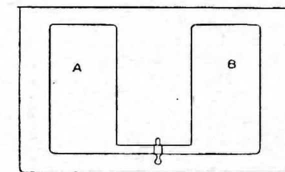
Sl. 126.

116. Toplina i radnja. 1. Kolika je specifična toplina, stoji do toga, kako grijemo tijelo. Da je tako, opažamo najlakše kod plinova. Plin se može na pr. i tako ugrijati, da mu ništa topline ne dovodimo. To će biti kada plin stisnemo; plin se time ugrije, kako jasno pokazuje pokus sa pneumatičkim užigačem (sl. 126.). U čvrstu cijev, dolje zatvorenu s velikom snagom gurnemo čep, tako da se stisne uzduh, što je u cijevi; uzduh se toliko ugrije, da se guba, koja je učvršćena u dnu čepa, upali. Radnja, što smo je izveli kod stiskanja plina, nadomješta dovođenje topline; drukčije rečeno: radnja je ekvivalentna dovođenju topline. (Lat. *aequivaleo, vrijedim jednako.*)

Kad stanemo sisati uzduh iz recipijenta sisaljke, termometar pokazuje, da se uzduh u recipijentu ohlađuje. To je obrat pređašnjega pojava. Uzduh u recipijentu rasteže se i gurajući suvišan uzduh napolje vrši radnju. Što plin vrši radnju, vrijedi toliko, kao da daje od sebe toplinu.

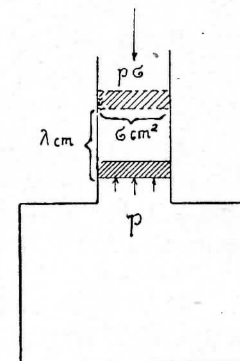
Dah je naš podalje od usta hladniji, jer se rastegnuo i vršio radnju.

2. Plin se može rastezati, pa da ipak ne vrši radnje; onda se plin ne će ni ohladiti (t. zv. Joulev zakon). U kalorimetru (sl. 127.) su dva valjka, jedan A sa zgusnutim uzduhom, drugi B isisan; valjci su spojeni sa cijevi, koja imade slavinu. Kad slavinu otvorimo, zgusnuti se uzduh raširi i u B. Pri tome nema pred sobom zapreke, te ne treba da vrši radnju, a kalorimetar ne pokazuje ohlađenja. (To vrijedi za pojav u cjelini. Kad bi svaki valjak stajao u osobitom kalorimetru, našlo bi se, da se uzduh valjka A ohladio, jer se njegovu širenju opire onaj dio uzduha, što je već prešao u B; uzduh se u B ugrije, jer ga stiskava uzduh iz A.)



Sl. 127.

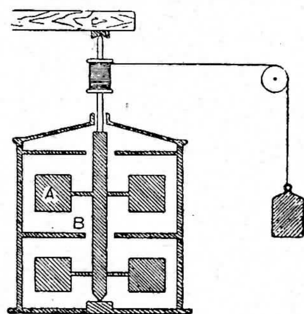
3. Da 1 kg uzduha ugrijemo od 0^0 C na 1^0 C, a držimo obujam stalan, treba uzduhu dovesti 0·172 kgkal; tlak uzduha raste. Grijemo li 1 kg uzduha normalnoga tlaka od 0^0 C na 1^0 C, a tlaka ne mijenjamo, uzduh se rasteže, pa kod toga grijanja treba dovesti 0·241 kgkal. Može se reći: specifična je toplina kod stalnoga tlaka veća od specifične topline kod stalnoga obujma. Razlog je tome taj, što se uzduh kod stalnoga tlaka grijanjem rasteže, pa vrši radnju. Ta je radnja dakle ekvivalentna razlici potrošenih toplina $0·241 - 0·172 = 0·069$ kgkal. Radnja se uzduha određuje ovim računom. Neka uzduh rastežući se tjera pred sobom čep proreza σ m² (sl. 128.), a tlak je p kg*/m²; čep pritiskuje silom σp kg*. Ako se čep pomakne za λ m, radnja je uzduha $\sigma p \cdot \lambda$ kg*m. Budući da je obujam uzduha narastao za $\Delta v = \sigma \lambda$, ta je radnja $p \cdot \Delta v$, a to je umnožak tlaka i porasta obujma. Kod normalnoga tlaka 10330 kg*/m² i temp. 0^0 C ima 1 kg uzduha obujam $^1/_{1·293}$m³; kad je temperatura narasla na 1^0 C, obujam se povećao (Gay-Lussacov zakon!) za $^1/_{1·293} \cdot {}^1/_{273}$ m³, dakle je radnja uzduha $^1/_{1·293} \cdot {}^1/_{273} \cdot 10330 = 29·26$ kg*m. Ta je radnja ekvivalentna gore spomenutoj toplini 0·069 kgkal. Prema tome je 1 kgkal ekvivalentna radnji $29·26 : 0·069 = 424$ kg*m. Taj se broj zove ***mehanički ekvivalent topline,*** a ovdje izvedenim putom izračunao ga je J. R. Mayer (1841.). Kasnije se našao takav račun među spisima, što ih je ostavio Carnot († 1832.).



Sl. 128.

4. Na nekoliko je načina tu veličinu odredio Joule (1842. i kasnije).

Iznijet ćemo metodu sa trenjem. Trenjem se može dobiti koliko hoćemo topline. Osobitu pažnju pobudiše krajem 18. vijeka pokusi grofa Rumforda (= Benj. Thompson), koji je pokazao, da je trenje kod bušenja topova neiscrpivo vrelo topline. Ti pokusi uskolebaše vjeru u hipotezu toplinske tvari. „Tvarna“ teorija topline učila je, da se kod trenja temperatura povisuje poradi toga, što je u tijelu toplina dijelom tobože „sakrivena“, pa se trenjem „oslobodi“. No kad se sveudiljnim trenjem ne može doći do granice, kod koje bi prestalo oslobađanje topline, množina je tobožnje sakrivene topline nevjerojatno velika.



Sl. 129.

Joule je isporedio radnju potrošenu na trenje sa toplinom, što se trenjem porodila. U valjkovitoj posudi s tekućinom vrtjele su se tarući se o tekućinu lopatice *A* (sl. 129.); poprečne stijene *B* čine, da bude trenje tekućine jošte veće; vrtnju izvađahu utezi načinom, kako ga slika objašnjava. Radnja, što je izvede zemlja, jer vuče utez, dobiva se množenjem puta i težine; a toplina se izračuna po tom, koliko je narasla temperatura posude. Onda se radnja i toplina isporede.

Prema točnijim je mjerenjima mehanički ekvivalent topline dan jednadžbom

$$1 \text{ kgkal} = 427 \text{ kg*m}$$

ili uz druge jedinice

$$1 \text{ gkal}_{15} = 4{\cdot}185 \text{ džul (dakle 1 džul} = 0{\cdot}24 \text{ gkal).}$$

Znak „=“ znači ovdje ekvivalentnost.

Ako jedinicu topline 1 kgkal zamijenimo jedinicom, koja je $^1/_{427}$ kgkal, možemo tu jedinicu topline zvati 1 kg*m, jer se može dobiti radnjom 1 kg*m; toplina 1 kg*m ekvivalentna je radnji 1 kg*m. To je „mehanička mjera topline“.

117. Opći zakon energije. Kad se uzduh rasteže i pri tom vrši radnju, gubi se toplina uzduha (pređ. §); radnja se dakle izvodi na trošak topline. Prema tome ćemo toplinu smatrati energijom, jer poput mehaničke energije može služiti kao izvor radnje (§ 54.). Osim kinetičke, potencijalne i toplinske energije mogu se pomišljati još i druge energije, pa zakon energije, koji je u § 54. izrečen samo za mehaničke pojave, vrijedi uopće:

u fizikalnom sustavu, koji nema sveze s ostalim svijetom, zbroj je kinetičke, potencijalne, toplinske i kojegod druge energije stalan. (Sve energije treba da se izraze istom jedinicom, na pr. kg*m.)

Prijmeri. Ako se kod Jouleova pokusa predočena slikom 129. ne obaziremo na kinetičku energiju uteza, jer je brzina padanja neznatna, energije su za različne visine sadržane u slijedećoj skrižaljci. Pomišljamo, da je utez težak 25 kg* i da može padati 3 m duboko.

visina	potencijalna energija	toplina	zbroj energija
3 m	25×3 = 75 kg* m	0 kg* m	75 + 0 = 75
2	25×2 = 50	25	50 + 25 = 75
1	25×1 = 25	50	25 + 50 = 75
0	0	75	0 + 75 = 75

Kad bi se uže, na kojem visi utez, u visini 2 m prerezalo, bila bi u visini 1 m potencijalna energija 25, toplina 25, kinetička energija 25, te je opet 25 + 25 + 25 = 75.

Kad se plin rasteže i ne vrši radnje, ne djeluje na ostali svijet, dakle mu energija ostaje stalna. Kako se pri tome ni temperatura ne mijenja, izlazi, da je energija plina kod različitih obujmova, a jednake temperature jednaka. — Ako se plin rasteže i pri tom vrši radnju, on se ohlađuje; hoćemo li da mu ipak ostane temperatura stalna, treba plinu dovoditi topline. U jednu ruku dakle plin predaje okolišu određenu množinu mehaničke energije, u drugu ruku prima plin od okoliša toplinsku energiju. Budući da je zbroj energija sustava, što sastoji od plina i njegova okoliša, stalan, a nije se ni energija plina samoga promijenila, ostala je dakle i energija okoliša stalna, t. j. koliko je okoliš radnjom primio mehaničke energije od plina, toliko je plinu doveo topline.

Spoznaju općega zakona energije zahvaljujemo osobito Mayeru, Jouleu i (teoretski) Helmholtzu (1847.).

Zad. 92. U komad olova mase 3 kg udare u isti čas s protivnih strana dvije željezne mase, svaka od 200 kg, sa brzinama, koje su dobile padajući kao njihala iz visine 1 m; udarcem se olovo izobliči i malne sva se kinetička energija pretvori u toplinu. Kolika je toplina? koliko naraste temperatura olova, ako mu je specifična toplina 0·031? [$^{400}/_{427}$ kgkal; za 10·1°]

Zad. 93. Kod vodopada se trenjem pretvori kinetička energija u toplinu. Za koliko nadmašuje temperatura vode ispod pada temperaturu vode, koja pada, ako je vodopad visok 43 m? [za 0·1°]

Zad. 94. Živa imade specifičnu toplinu 0·033; koju bi visinu morao imati pad žive, da trenjem na podnožju pada naraste temperatura žive za 0·1°? [1·4 m]

Zad. 95. Tijelo, koje iz velike („beskrajne“) daljine padne na Sunce, stigne na površinu sunčanu sa brzinom 637 km/sek; koliko se udarcem stvori topline, ako je masa tijela 1 kg? [49000000 kgkal]

118. Kinetička teorija topline. Kad se upoznalo, da je toplina vrst energije, nanovo mnogi prihvatiše staro, često nabačeno mišljenje, da je toplina gibanje molekula. Pristaše te kinetičke teorije (§§ 88., 91., 100.)

rekoše: kad toplina nastaje na trošak mehaničke energije, a mehanička na trošak toplinske, ne može toplina da bude drugo negoli opet mehanička energija. Drugi ne htjedoše priznati, da je taj zaključak valjan, već dopuštahu, da je toplina u biti svojoj različna od mehaničke energije, te da se bit topline možda i ne može odgonetnuti. No naučnim razvojem posljednjega doba kinetička se teorija topline toliko utvrdila, da joj danas nitko ne poriče valjanost.

Da uzmogne kinetička teorija osim Boyleova zakona (§ 100.) objasniti i Gay-Lussacove zakone, treba uzeti da je apsolutna temperatura razmjerna srednjoj kinetičkoj energiji molekula plina. Ako se kraj stalnoga obujma plin ugrije, kinetička energija molekula prosječno naraste, udarci molekula postaju jači, pa se tim i tlak poveća. Ako plin vrši radnju i tjera pred sobom čepalj, molekule se odbijaju od stijene, koja uzmiče, dakle se time brzine molekula umanjuju, te i temperatura plina spadne. Ako se plin rasteže, a ne vrši radnje, molekule lete u prazno, brzina im se ne mijenja, te i temperatura ostaje nepromijenjena.

Kinetičke su energije različitih molekula različite, a i kinetička energija jedne iste molekule s vremenom se mijenja. Budući da temperaturu dovodimo u svezu sa srednjom kinetičkom energijom, vidimo da je temperatura pojam „statistički", koji vrijedi samo za mnogo molekula, a nema smisla govoriti o temperaturi jedne molekule. (Statistika u običnom smislu riječi bavi se brojenjem i ispitivanjem pojava u državnom i društvenom životu; lat. *status, država*).

119. Avogadrov zakon. Kemijski pojavi navedoše na hipotezu, koja glasi: jednaki obujmovi kojih god plinova obuhvataju (kod jednakih tlakova i jednakih temperatura) jednako mnogo molekula (Avogadro 1811.). Na pr. u 1 je litri vodika toliko molekula koliko u 1 litri kisika. Ta tvrdnja ide među osnovne kemijske nauke, pa se na njoj osnivaju kemijske formule poput H_2O, HCl i t. d. Kasnije je i kinetička teorija utvrdila Avogadrovu hipotezu, te nam ona danas vrijedi kao neprijeporan fizikalni zakon.

Oslanjajući se na Avogadrov zakon možemo ispoređivati mase molekula. 1 litra acetilena važe 13 puta višo negoli 1 litra vodika, pa budući da te množine plinova imadu jednako mnogo molekula, jeste i molekula acetilena 13 puta teža od molekula vodika. Kemijska jedinica mase (§ 19.) uvedena je jedno poradi toga, što su obične jedinice — gram, miligram i t. d. — kud i kamo prevelike spram masa molekula, a još više zato, što se do nedavna nije ni približno znalo, koliko je puta masa 1 g veća od masa molekula i atoma. (Iz sličnih razloga astronomi uzimlju za jedinicu masu sunčanu.)

Mase različitih atoma pobilježene su u tablici atomnih masa, kojom se kemičari obilno služe. Evo izvadak iz te tablice:

vodik	H	1·008	željezo	Fe	55·84
helij	He	4·00	srebro	Ag	107·88
ugljik	C	12·000	olovo	Pb	207·20
dušik	N	14·008	radij	Ra	225·95
kisik	O	16·000	uran	U	238·17

Masa se molekule može izračunati, ako je poznata kemijska formula molekule. Formula je ugljikova dvokisa CO_2, dakle je molekularna masa $12{\cdot}0 + 2 \times 16{\cdot}0 = 44{\cdot}0$; molekularna je masa kisika O_2 32·000, vodika H_2 2·016, acetilena C_2H_2 26·0, amonijaka NH_3 17·03 i t. d.

Zamislimo 32 g kisika, u drugoj posudi 26 g acetilena, a u trećoj 17·03 g amonijaka, t. j. onolik broj grama tvari, kolikim je brojem dana molekularna masa. Tako odabrane množine zovu 1 mol (skraćeno od „molekula"), pa smo evo zamislili 1 mol kisika, 1 mol acetilena, 1 mol amonijaka. (Prema tome je 1 mol jedinica mase, koja se za svaku tvar drukčije odabira.) Kako masa 1 mol kisika stoji prema masi 1 mol acetilena u istom omjeru, u kojem su i mase molekula tih tvari (32 : 26), razabiramo, da 1 mol kisika ima toliko molekula, koliko ima 1 mol acetilena. Jedinica mase 1 mol odabrana je dakle tako, da sve tvari u 1 molu imadu jednako mnogo molekula.

Neka je p_1 tlak, v_1 obujam, T_1 temperatura mase 1 mol kisika, p_2, v_2, T_2 vrijednost tih veličina za masu 1 mol acetilena, p_3, v_3, T_3 za masu 1 mol amonijaka. Jednadžbe su tih plinova (§ 114.)

$$p_1 v_1 = B_1 T_1, \quad p_2 v_2 = B_2 T_2, \quad p_3 v_3 = B_3 T_3.$$

Ako se te mase nalaze u jednakim obujmovima, te je $v_1 = v_2 = v_3$, pa ako su temperature jednake, $T_1 = T_2 = T_3$, bit će po Avogadrovu zakonu i tlakovi jednaki, jer ima jednako mnogo molekula; dakle je $p_1 = p_2 = p_3$. Prema tome slijedi iz jednadžbe drugoga i trećega plina

$$p_1 v_1 = B_2 T_1 \;, \; p_1 v_1 = B_3 T_1,$$

a odatle $B_2 = B_3 = B_1$, t. j. za 1 je mol konstanta B kojegagod plina ista, tako da ***za 1 mol*** kojegagod plina vrijedi jednadžba

$$\boldsymbol{pv = 8{\cdot}315 \times 10^7 \times T} \text{ (din/cm}^2\text{, cm}^3\text{, }^0\text{K).}$$

Prema tome da nađemo jednadžbu, što vrijedi na pr. za 100 g kisika, treba najprije tu masu izraziti molima: 100 g kisika$=100/32 \times 32$ g$=100/32$ mola. Za tu množinu dakle vrijedi jednadžba $pv = 100/32 \times 8{\cdot}315 \times 10^7 \times T$.

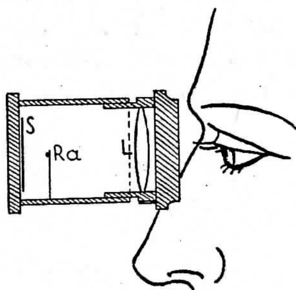
Veličina $8{\cdot}315 \times 10^7$ zove se plinska konstanta.

Zad. **96.** Kolik obujam zapremaju 2 g amonijaka kod 0°C i tlaka 1 normalna atmosfera ($=76 \times 13{\cdot}6 \times 981$ din/cm²)? [2·63 litre]

Zad. **97.** Koliko je kisika u 1m³ kod tlaka 1 kg*/cm² i 27°C? [39·3 mola = 1·26 kg]

120. Broj molekula. U 20. je vijeku uspjelo, da se na više načina odredi broj molekula, pa različiti putovi vode do skladnih rezultata. Ovdje

će se prikazati metoda, koja se osniva na pojavu radioaktivnosti. Našlo se, da se u okolišu elementa radija, a i drugih mnogih „radioaktivnih“ tvari sporo, ali neprestance, stvara plinoviti element helij (Rutherford 1903.); radij izbacuje t. zv. alfačestice, a one sabirajući se čine helij. Ako blizu zgodne radioaktivne tvari stavimo zastorić, obložen tutijinim blistavcem, vidjet ćemo u tmici svjetlucanje. Motrimo li zastorić lupom, ne će nam se činiti jednolično svjetao, nego ćemo ugledati mnoštvo sjajnih točaka, koje sinu i odmah iščeznu sad ovdje sad ondje (Crookes 1903., Elster i Geitel 1903.). Crookes je načinio jednostavnu spravicu, spintariskop (grč. σπινθήρ, *iskra*), koja osobito lijepo pokazuje taj pojav (Sl. 130. S = blistavac, Ra = mrvica radioaktivne tvari, L = lupa). Pomišljamo, da je svaki bljesak ili scintilacija u spintariskopu učinak udarca jedne alfačestice. Alfačestica je doduše sitna, ona je samo „jezgra“ atoma helija, ali joj je poradi silne brzine kinetička energija dosta velika, da se srazom stvori toliko svjetlosti, da je oko spazi. Ako nema odviše radioaktivne tvari i zastorić nije odviše blizu, mogu se scintilacije brojiti (Regener 1908.). Znamo li, koliko alfačestica pogodi zastorić u 1 min, možemo iz namještaja zastorića i radioaktivne tvari odrediti, koliko uopće ta tvar baca ili emitira (lat. *emitto, izašiljem*) čestica na sve strane. Za izvjesnu radioaktivnu tvar (1 g radija u „ravnoteži“ s proizvodima njegova raspadanja) našlo se, da emitira u 1 sek $14{\cdot}8 \cdot 10^{10}$ alfačestica, t. j. u 1 danu $14{\cdot}8 \cdot 10^{10} \cdot 86400$, dok se u drugu ruku odredilo (Dewar 1908.), da jednaka množina te tvari stvara u 1 danu 0·46 mm^3 helija normalnoga tlaka i temp. 0^0 C. Kako svaka alfačestica daje 1 atom helija, izlazi, da je u 0·46 mm^3 helija $14{\cdot}8 \cdot 10^{10} \cdot 86400$ atoma; može se reći također, da ima toliko molekula helijevih, jer kemijski i fizikalni razlozi nukaju nas na mišljenje, da je u helija kao i u nekih drugih elemenata molekula isto što i atom. Dijeljenjem sada izlazi, da u 1 cm^3 helija ima $28 \cdot 10^{18}$ molekula, a po Avogadrovu zakonu vrijedi isto za kojigod drugi plin.



Sl. 130.

Izričući dobiveni rezultat treba du svaki puta kažemo, da vrijedi kod 0^0 C i pod tlakom normalne atmosfere; jednostavnije je, ako kažemo, koliko je molekula u 1 molu. 1 cm^3 plina ima kod 0^0 C i normalnog tlaka $\frac{1 \cdot 76 \cdot 13{\cdot}6 \cdot 981}{8{\cdot}315 \cdot 10^7 \cdot 263} = 0{\cdot}0000446$ mola (isp. zad. pređ. §); dakle je u 1 molu $\frac{28 \cdot 10^{18}}{0{\cdot}0000446} = 6{\cdot}2 \cdot 10^{23}$ molekula. Broj molekula u 1 molu zovu ***Avogadrov*** ili ***Loschmidtov broj*** (najstariju je metodu za određivanje toga broja našao Loschmidt, 1865.). Točnije metode daju za taj broj

6·03$\times$***10***^{23} ili $0{\cdot}603 \times 10^{24}$ ili 0·603 kvadriljuna.

Znajući Avogadrov broj možemo masu kojegagod atoma odrediti u gramima. U 1 molu kisika O_2 t. j. u 32·0 g ima $6{\cdot}03 \times 10^{23}$ molekula, dakle važe 1 molekula kisika $\frac{32{\cdot}0}{6{\cdot}03 \cdot 10^{23}} = 5{\cdot}3 \cdot 10^{-23} = 53 \cdot 10^{-24} = 53$ kvadriljuntine grama, a masa je atoma kisikova polovica od toga t. j. $2{\cdot}65 \cdot 10^{-23}$ g.

Zad. **98.** Koliko grama ima masa atoma vodikova? koliko masa atoma helijeva? [$1{\cdot}67 \cdot 10^{-24}$ g; $6{\cdot}62 \cdot 10^{-24}$ g]

Zad. **99.** Kolika je kinetička energija alfačestice emitirane radijem, ako joj je masa $6{\cdot}62 \cdot 10^{-24}$ g, a početna brzina — kako izlazi iz električkih i magnetičkih pokusa — 15 000 km/sek? koja je toplina tome ekvivalentna? [$7{\cdot}4 \cdot 10^{-6}$ erg; $1{\cdot}8 \cdot 10^{-13}$ gkal]

Zad. **100.** Koliko imade atoma u 1 gramu vode (H_2O)? [u svemu otprilike 10^{23}]

Zad. **101.** Koliko imade molekula u 1 cm^3 uzduha u Crookesovoj cijevi, ako je tamo kod 20^0 C tlak 0·001 mm? [33 biljuna]

121. Toplina i radioaktivnost. Našlo se, da tvar jače radioaktivnosti ima nešto višu temperaturu od okoliša (P. Curie 1903.). Kako toplina s toplijega mjesta teče prema hladnijemu, ta se viša temperatura može držati samo na taj način, da radioaktivna tvar neprestance stvara toplinu Tu toplinu pripisujemo poglavito energiji alfačestica. Alfačestica izleti sa brzinom mnogo većom nego što je srednja brzina toplinskoga molekularnoga gibanja, te ima znatnu kinetičku energiju. Kada se srazi s ostalima molekulama radioaktivne tvari ili okoliša, gubi alfačestica najveći dio svoje kinetičke energije, pa time naraste srednja kinetička energija ostalih molekula, dakle naraste i temperatura.

1 g radija (u „ravnoteži“ s proizvodima svoga raspadanja) stvara u 1 satu 139 gkal topline. To je silna toplina, jer se radij sporo troši. Nijedan se kemijski pojav ne može obiljem energije isporediti s pojavom radioaktivnosti. Na pr. 1 g ugljena potpuno izgarajući daje 8000 gkal topline, dok 1 g radija daje za vrijeme svega svoga „života“ do 3 milijarde ($3 \cdot 10^9$) gkal.

Između pojava topline kod radioaktivnosti i kemijske topline još je i ta razlika, da ima kemijskih pojava, koji toplinu troše, dok se radioaktivnošću toplina samo stvara.

Dobivanje topline radioaktivnošću uvelike je zanimljivo s obzirom na fiziku Zemlje. Spuštamo li se u rov, temperatura raste (na pr. za 1^0 na svakih 40 m dubljine). Odatle zaključujemo, da toplina teče iz nutrine zemaljske k površini, a s površine se gubi u Svemir. Dok se još nije znalo za radioaktivnost, pomišljalo se, da poradi toga neprestanoga odilaženja topline temperatura Zemlje pada. Kušalo se ća i izračunati, koliko je miljuna godina prošlo od doba, kad se površina Zemlje toliko ohladila, te se očvrsnula. Danas znamo, da je taj račun bio jalov. Ne znamo naime, koliko se spomenuti gubitak topline nadomješta toplinom, što je stvaraju zemaljske radioaktivne tvari.

122. Taljenje i očvršćivanje. Ako neko tijelo prijeđe iz čvrstoga oblika u tekući ili u plin, kažemo, da je promijenilo svoju skupnost ili agregatno stanje (lat. *aggrego, pridružujem se*). Prelaženje čvrstoga tijela u

tekućinu zove se taljenje, a obrnuta promjena očvršćivanje. U mnogim se primjerima ti pojavi zbivaju kao kod vode:

Ako se led temperature ispod 0° C grije, temperatura raste sve do 0° C. Onda započinje taljenje, te se led tali postepeno toliko brzo, koliko brzo dovodimo toplinu; temperatura smjese leda i vode ne raste, već ostaje 0° C, ma da se neprestance dovodi toplina. Tek kad je zadnji ostatak leda rastaljen, temperatura opet počinje rasti (Deluc 1754.). — Temperatura, kod koje se tijelo tali, zove se talište tijela.

Da led od 0° C pretvorimo u vodu od 0° C, treba mu dovoditi toplinu. Toplina, što je treba privesti masi 1 kg leda, da se rastali, zove se tališna toplina leda, a množina joj je 80 kgkal (Black 1757.). Krupno je možemo odrediti ovako. 1 kg leda od 0° C polijemo sa 1 kg vode od 100° C; dobiju se 2 kg vode od 10° C (ako nije toplina prešla u okoliš ili obrnuto). Vruća je voda izgubila 90 kgkal, jer joj se temperatura snizila za 90°; od te se topline potrošilo 10 kgkal, da se rastaljeni led ugrije od 0° C na 10° C; dakle je ostatak $90 - 10 = 80$ kgkal potrošen na samo taljenje.

Kad vodu ohlađujemo, smrzava se kod one iste temperature, kod koje se led rastalio. Kad se smrzne 1 kg vode, pojavi se (ili „oslobodi") 80 kgkal topline, t. j. toliko, koliko se potrošilo, kad se 1 kg leda rastalio.

Čista se voda može ohladiti i ispod 0° C, a da se ne smrzne (Fahrenheit 1714.). Ako se ovako „pothlađena" voda potrese, jednim se mahom stvori led, a dobivena toplina digne temperaturu na 0° C. Osobito se onda dade tekućina znatno pothladiti, ako se nigdje ne dotiče čvrste koje tvari. To biva, kada kapljice pothlađene vode lebde u kojoj drugoj tekućini. Kad je kapljica kiše pothlađena, pa udari na tle, odmah se smrzne, pa nastaje poledica.

Led, kojemu je temperatura ispod 0° C, može se rastaliti, ako ga veoma stlačimo. Što više naraste tlak, to više spadne talište. Ako se dva komada leda čvrsto stisnu, rastale se na dotačištu, a kad pritisak popusti, voda se opet smrzne i oba se komada slijepe. Taj se pojav zove regelacija (lat. *re-, opet; gelu, led*). Primjena kod tumačenja ledenjaka.

Gdjekoje kovinske slitine imadu niže talište negoli njihove sastojine (Rose 1772.). Poimence je talište Woodove slitine 65° C, dok njezine sastojine Bi, Pb, Sn, Cd imadu redom tališta 271°, 327°, 232°, 321°. —

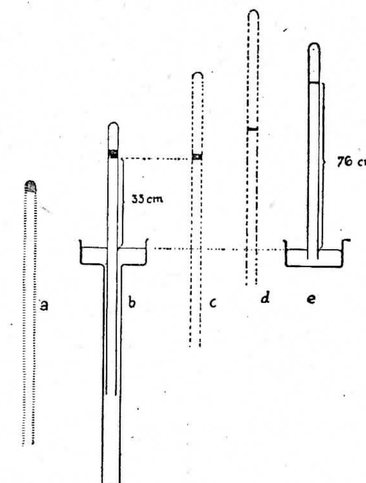
I kod otapanja čvrsto se tijelo pretvara u tekućinu, a pri tom se redovno troši toplina (Boyle). Ako se 1 kg kuhinjske soli smiješa sa 3 kg smrvljenog leda, led se i sol otapaju jedno u drugome, pa se temperatura snizi i do —20° C. Miješanjem snijega i klorkalcija $CaCl_2$ može se doći i do —55° C. — Ako u vodi rastopimo sol, ledište spadne ispod 0° C.

Zad. **102.** 2 kg leda od 0° C bacimo u 10 kg vode od 60° C; kolika će biti konačna temperatura? [36·7° C]

Zad. **103.** Koliko se kilograma leda od 0° C može rastaliti u 10 kg vode od 60° C [7·5 kg]

Zad. **104.** 2 kg leda od —10° C bacimo u 10 kg vode od 60° C; kolika je konačna temperatura, ako je specifična toplina leda 0·5? [35·8° C]

123. Pare. Ako tanjur s vodom ostavimo na miru, iza nekoga će vremena vode nestati; voda se „isparila", ona je „ishlapila", tekuća se voda pretvorila u plin, koji se zove vodena para, a vodene pare primiješale su se uzduhu. Brže se isparuju alkohol i eter. — Jednostavniji je pojav, kad se voda isparuje u prostor, u kojemu su samo pare njezine, a nema uzduha; pokusi o tome zgodno se nadovezuju na Torricellijev pokus o tlaku uzduha (Watt). Staklena cijev neka je još dulja negoli u Torricellijevu pokusu, a posuda sa živom neka dopušta, da se cijev duboko u nju utisne (sl. 131. b). Cijev se gotovo sasvim napuni živom, ostatak cijevi sa kapi etera, cijev se začepi, okrene, otvor uroni pod živu u posudi i čep ukloni. Eter je lakši od žive, te se sabira nad živom i to bilo kao tekućina, bilo kao pare, bilo oboje.



Sl. 131.

Što se sada događa, ako kod određene temperature na pr. 20° C cijev dižemo ili spuštamo? Ako je cijev duboko utisnuta (sl. a), sav je eter tekućina. Ako se cijev diže, isprva će se — poradi tlaka uzduha — dizati i stupac žive, no kada taj stupac dosegne visinu 33 cm iznad izvanje površine žive (kod uzdušnoga tlaka 76 cm), ne će se više dizati, a prostor, što je u cijevi iznad žive, napunit će se eterovim parama (sl. b, c). Zašto ne stoji živa do visine 76 cm kao u Torricellijevu pokusu (sl. e)? Razlog je tome taj, što protiv tlaka izvanjega uzduha djeluje tlak eterovih para u cijevi. Budući da razlika tih tlakova drži stup žive visok 33 cm, to je tlak eterovih para jednak tlaku stupca žive visokoga $76 - 33 = 43$ cm. To vrijedi doklegod još ima eterove tekućine u cijevi.

Ako nema mnogo etera, pa ako se obujam cijevi iznad stupca žive toliko povećao, da se sav tekući eter pretvorio u pare, ne mogu se više nove pare stvarati. Ako se onda prostor para još i dalje poveća, tlak para postaje manji, živa se diže (sl. d).

Ako se pare dotiču svoje tekućine, a isparivanje je dovršeno, pare se zovu „zasićene" (sl. b, c). Tlak zasićenih para stoji do temperature. Kod 20° C tlak je zasićenih eterovih para = 43 cm, kod 0° C samo

18 cm. Uz to tlak zasićenih para zavisi o vrsti tvari. Zasićene vodene pare izvode mnogo manji tlak negoli zasićene eterove pare jednake temperature. Kod 20⁰ C tlak je vodenih para samo 1·7 cm. Tlak je živinih para kod obične temperature manji od 0·005 cm, pa se na nj redovno i ne obaziremo.

Ako u 1 cm^3 imade manje para, nego što bi kod dane temperature moglo biti, pare su „nezasićene" (sl. d). U pokusu, što ga opisasmo, došlo je do takvih para povećavanjem obujma kod stalne temperature. Drugi je, jednostavniji put, kojim se dobivaju nezasićene pare, da se uzme zatvorena posuda, u kojoj je samo malo tekućine, a najviše para, pa je grijemo. Gustoća se zasićenih para povisivanjem temperature povećava. Grijanjem se dakle sve više tekućine isparuje, dok najposlije nije tekućine nestalo. Povisuje li se još i dalje temperatura, gustoća ne može više rasti, dakle ona zaostaje za gustoćom, što bi je pare mogle imati, da su zasićene. S obzirom na taj način dobivanja zovu se nezasićene pare također preugrijane.

Tlakove zasićenih vodenih para odredili su pomnjivo Regnault (1843.) i Magnus (1843.) (važno za parostroj, meteorologiju i t. d.). Evo malen prijegled tih tlakova, izraženih što u mm (stupac žive!) što u atmosferama; treći stupac tablice sadrži gustoće zasićenih para.

temp.	tlak zasićenih vodenih para	gustoća zasićenih vodenih para
0⁰ C	4·6 mm	4·8 g/m^3
20	17·4	17·3
40	54·9	—
46	0·1 atmosfera	—
82	0·5 „	—
100	760 mm = 1 atmosfera	0·6 g/litra
200	15 „	8

124. Isparivanje na uzduhu. Ako u posudu nalijemo nešto vode, odmah zatvorimo i pričekamo, sabrat će se najposlije u svakom cm^3 iznad tekuće vode toliko vodenih para, kao da i nema uzduha u posudi. Množina je zasićenih para jednaka, bio uzduh prisutan ili odsutan. I ovdje vrijedi Daltonov zakon (§ 101.): tlak smjese uzduha i vodenih para jednak je zbroju tlaka, što bi ga uzduh sam izvodio, i tlaka zasićenih para. Zbrajanje se tih tlakova lako opaža, ako netom opisani pokus izvedemo s eterom, umjesto sa vodom, a posuda je spojena s manometrom.

Množina se vodenih para u atmosferi neprestance mijenja. Obično je ima manje, nego što bi kod dane temperature moglo biti. Množina se para izražava na pr. tako, da se kaže, koliko je grama vodenih para u 1 m^3

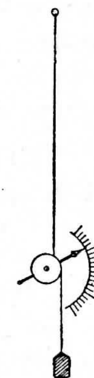
zraka; taj se broj zove apsolutna vlaga uzduha. Ako množina para iznosi $p^0/_0$ one množine, što bi je uzduh kod dane temperature mogao sadržavati, kažemo, da je relativna vlaga $p^0/_0$. Neka je na pr. nekom zgodom temperatura 20⁰ C, a vodenih para neka ima 11 g/m^3; budući da uzduh od 20⁰ C može držati 17·3 g/m^3 vodenih para (isp. tablicu pređ. §), relativna je vlaga 11/17·3 · 100$^0/_0$ = 63$^0/_0$. Prema tome je relativna vlaga potpuno osušenoga uzduha 0$^0/_0$, a „zasićenoga" 100$^0/_0$. Svejedno je, spomenemo li apsolutnu ili relativnu vlagu, jer uz pomoć tablice gustoće možemo jedno iz drugoga izračunati.

Pomislimo, da uzduh od 30⁰ C ima 17·3 g/m^3 vlage; on dakle nije zasićen, jer bi — prema tablici — kod te temperature mogao imati više para. No ako se uzduh ohladi na 20⁰ C, bit će zasićen, a ako temperatura još dublje spane, suvišne se pare kondenziraju (lat. *condensatio, zgušćavanje*) ili pretvaraju u vodu, t. j. u kapljice, koje lebde u zraku (magla, oblaci) ili se hvataju tla (rosa). Magla nastaje, kad se uzduh ohlađuje, oblaci navlastito time, što se uzduh diže, pri tom rasteže i ohladi. Pokusom se lako načini magla; uzduh se pod recipijentom sisaljke zasiti vodenim parama, a onda razrijedi.

Ljeti se može množina vlage odrediti ovim jednostavnim pokusom. U čašu s vodom stavi se termometar i pomalo se bacaju u vodu komadići leda. Kad temperatura spadne do izvjesne vrijednosti („rosište"), uzduh, što je najbliži čaši, ne može više držati svu svoju vlagu i čaša se orosi. Množina je vlage tolika, da zasićuje uzduh kod temperature, što je ima voda u čaši. Možemo prema tome množinu te vlage u tablici pročitati.

Sprave za određivanje vlage zovu se higrometri (grč. ὑγρός, *vlažan*). Vrlo je poznat higrometar sa vlasi (Saussure 1783., sl. 132.), koji služi za određivanje relativne vlage. Nije doduše sasvim pouzdan, te ga treba češće ispitivati, ali je vrlo jednostavan. Čovječja se vlas, iz koje je mast uklonjena, rastegne to jače, što je veća relativna vlaga uzduha. Vlas je na gornjem kraju učvršćena, a na donjem namotana na kotačić, koji nosi kazaljku, a vrti se oko čvrste osi. Malen utez nastoji da zakrene kotačić, pa time nateže vlas. Ljestvica seže od 0$^0/_0$ do 100$^0/_0$, a načini se empirički (taj pojam v. u § 93.).

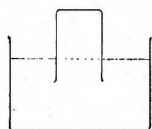
Vjetar föhn (lat. *Favonius*) u Alpama i drugdje silazi s gorskih visina, snijegom pokritih, te neobično povisuje temperaturu (osobito zimi), a izvodi suhoću kao u pustinji. Uzduh se padanjem stlači u manji obujam i time ugrije; apsolutna mu je vlaga u gorskoj studeni i kraj zasićenosti bila malena, pa kad je uzduh stigao u nizinu, zaostaje njegova vlaga daleko za onom množinom para, što bi je sada uzduh mogao imati; relativna se vlaga dakle smanjila. (I bura u Hrvatskom Primorju jest padajući vjetar, no ona je studena, jer ne dolazi iz velike visine.)



Sl. 132.

125. Vrenje. Ako nad tekućinom prostor nije zasićen parama, tekućina se isparuje; kod dosta visoke temperature tekućina "vri" ili „ključa"; isto se događa i kod dosta niskoga tlaka. Pod recipijentom uzdušne sisaljke vri i mlaka voda (Boyle 1659.), pa i studena (ako sisaljka dosta brzo uklanja vodene pare). Vrenje se od običnoga ispa-

rivanja razlikuje ponajpače time, što se kod vrenja tekućina isparuje i u unutarnjosti svojoj, a ne samo na površini. Da tekućina vri, treba da tlak u mjehurićima, što se stvaraju u tekućini, bude dosta jak, da svlada tlak atmosfere, koja na tekućinu tišti. Kako su pare u spomenutim mjehurićima zasićene, treba da je njihov tlak bar jednak tlaku atmosfere. Tekućina dakle vri kod one temperature, kod koje je tlak njezinih zasićenih para jednak tlaku atmosfere. Ako temperaturu vrenja vode kraj tlaka 1 normalne atmosfere označimo sa 100° C, utvrđujemo time i to, da je kod 100° C tlak zasićenih vodenih para = 1 normalnoj atmosferi (isp. tablicu u § 123.). Kod tlaka 0·5 atmosfere, dakle na gori visokoj 5500 m, voda će uzavreti kod 82° C (Isp. tablicu). Određivanje visine vrelištem vode. — Papinov lonac (1681.). — Temperatura, kod koje tekućina vri, ako je tlak 1 normalna atmosfera, zove se normalno vrelište tekućine.


Sl. 133.

Da je kod vrenja tlak zasićenih para jednak tlaku atmosfere, pokazuje ovaj pokus. Stakleno zvono, s otvorom dolje okrenuto, neka je puno vode, a otvor je ispod površine vode u široj jednoj posudi (sl. 133.). Grijemo li posudu, tako da voda uzavri, voda će pod zvonom sezati do iste visine kao i izvan njega; tlak zasićenih para u zvonu drži dakle ravnotežu tlaku atmosfere. (Desaguliers 1729.). — Staklenu tikvicu do polovice napunimo vodom i pustimo, da voda uzavri; onda uklonimo plamen, tikvicu odmah začepimo i okrenemo. Voda će onda, kadgod tikvicu polijemo hladnom vodom, nanovo uzavreti, ma da je već toliko ohladila, da tikvicu možemo u ruku uzeti. Uz ohlađene se stijene vodene pare kondenziraju, tlak se para smanji, pa se kondenzirane pare vrenjem nadomjeste.

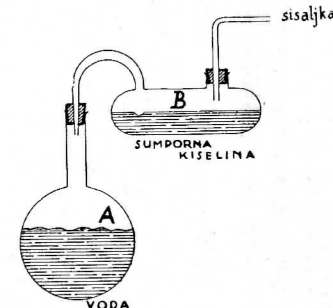
Ako u vodi nema apsorbiranoga uzduha, može se desiti, da voda ne vri, ma da je ugrijemo iznad obične temperature vrenja. Kažemo, da vrenje „zakašnjava".

126. Toplina isparivanja. Kao kod taljenja tako se i kod isparivanja troši toplina. Na primjeru ćemo pokazati, kako se može krupno odrediti toplina, što je treba privesti masi 1 kg vode od 100° C, da se pretvori u pare od 100° C (Black). Stavimo posudu s 1 kg vode od 25° C na plamen i odredimo urom, koliko vremena prođe do časa, kad voda započne vreti; pustimo vodu vreti, dok ne prođe nanovo jednak razmak vremena. Približno sada vrijedi, da je voda u prvom i u drugom razmaku vremena primila jednako mnogo topline. U prvom se razdoblju ta toplina — 75 kgkal — potrošila gotovo samo na ugrijavanje vode, u drugom na isparivanje. Ako se vaganjem nađe, da je vrenjem iščezlo 0·140 kg vode, slijedi, da za isparivanje 0·140 kg vode treba 75 kgkal, dakle za 1 kg vode 75 : 0·140 = 536 kgkal. Da 1 kg vode od 100° C pretvorimo u pare od 100° C, treba 536 kgkal

topline. Taj se broj zove toplina isparivanja vode. Toplina je isparivanja kod različitih temperatura različita.

Da se isparivanjem troši toplina, opaža jasno, tko iza kupanja mokra tijela stoji na vjetru; vjetar donosi neprestano nezasićenoga uzduha, te je isparivanje osobito znatno, pa se i mnogo topline troši. — Ako iz posude s vodom jakom uzdušnom sisaljkom uklanjamo vodene pare, voda se ohlađuje i smrzne; ako sisaljka nije dosta jaka, isparivanje se pospješuje tako da uz vodu A (sl. 134.) stavimo koncentriranu sumpornu kiselinu B; sumporna kiselina žestoko upija vodene pare, tako da od struje para može nastati na površini kiseline udubina (Leslie 1810.).

Koliko se potroši topline, kada se 1 kg tekućine pretvori u pare, toliko se „oslobodi" topline, kad se pare kondenziraju. Potonja se toplina određuje u bitnosti ovako. U posudu sa P g vode od t^0 C uvodimo iz parnoga kotla vodene pare od 100° C. Pare se u vodi kondenziraju, te množina vode u posudi i temperatura vode rastu. Kad prekinemo dovođenje para, neka je temperatura t'^0 C, a množina vode neka je narasla za Q g. Prvobitna je voda ugrijavanjem primila $P\,(t' - t)$ gkal. Ako 1 g para kondenzacijom dade x gkal, onda je Q g dalo $Q\,x$ gkal. Kondenzirana voda ohladila se od 100° C na t' °C i time je izgubila toplinu $Q(100 - t')$ gkal.



Sl. 134.

Koliko je ta voda izgubila topline, toliko je prvobitna dobila; dakle je

$$Q\,x + Q\,(100 - t') = P\,(t' - t).$$

Osim x sve se veličine u toj jednadžbi mogu izmjeriti, pa se iz njih x izračuna.

Kad se voda isparuje, određeni se dio topline isparivanja troši na to, da voda dobivajući veći obujam vrši radnju. Radnja se izračuna ovako. 1 kg zasićenih para od 100° C zaprema više negoli 1600000 cm³ (slijedi iz tablice u § 123), dok je obujam 1 kg vode od 100° C samo malko veći od 1000 cm³. Radnja kod povećavanja obujma jednaka je umnošku $p \cdot \Delta v$ (isp. § 116), gdje je $p = 1$ atmosfera $= 1{\cdot}033$ kg*/cm², $\Delta v = 1600000$ cm³. Radnja je dakle $1{\cdot}33 \times 1600000$ kg*cm $= 1033 \times 16$ kg*m $= 1033 \times 16 : 4{\cdot}27$ kgkal $= 39$ kgkal. Oduzme li se ova veličina od topline isparivanja 536 kgkal, ostaje 497 kgkal kao toplina, koja se troši na „unutarnju radnju", t. j. na svladavanje molekularnih sila, koje drže tekućinu na okupu.

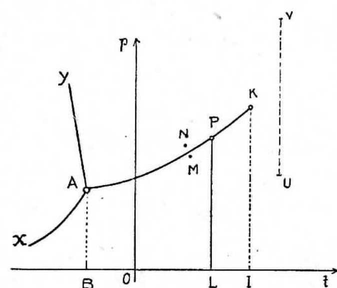
Trošenje topline kod isparivanja primjenjuje se za pravljenje leda u Carréovu stroju (1857.). U tom se stroju amonijak ili druga koja zgodna tvar sisaljkom stlačuje, a vodom hladi (temp. na pr. 20° C), da se pretvori u tekućinu. Tekući se amonijak prevodi u drugi prostor, iz kojega se sisanjem uklanjaju amonijakove pare, te nastaje živo isparivanje amonijaka i ohlađivanje (otprilike na — 10° C). Potonji je prostor opkoljen slanom

vodom, a u toj su vodi i posude s vodom, koja se ima smrznuti. Dobivene se pare amonijakove opet pretvore u tekućinu i t. d. Uzimlje se slana voda, koja se u tim prilikama ne smrzava.

Zad. **105.** U 20 kg vode od 15° C puštamo 0·5 kg zasićenih vodenih para od 100° C; kolika je konačna temperatura? [30° C]

Zad. **106.** U kondenzatoru parostroja vlada temperatura 45° C, a uvode se u nj pare te iste temperature i voda za hlađenje s temp. 18° C; koliko kg vode treba dovesti na svaki kg para, ako je toplina isparivanja 575 kgkal? [21 kg]

127. Kritična temperatura. Između para i plinova nema razlike. Plin zovemo parom, kad pomišljamo, da je nastao od tekućine. Može li se svaki plin pretvoriti u tekućinu? Oko rješenja toga pitanja radilo se gotovo od početka 19. vijeka; plinove stiskavahu i ohlađivahu, pa je doista uspjela likvefakcija mnogih plinova (lat. *liquefacio*, *činim tekućinom*). Ipak neki plinovi — među njima dušik, kisik i vodik — nikako ne htjedoše postati tekućinom, te ih prozvaše permamentnima (lat. *permaneo*, *ostajem*). Koji je tomu bio razlog, objasnio je Andrews (1869.).



Sl. 135.

Da je neka tvar tekuća, pokazuje nam površina njezina. Umjesto da tlak zasićenih para, što su iznad te površine, prikažemo tablicom (§ 123.), predočit ćemo ga grafički u koordinatnom sustavu, u kojem kao apscise nanosimo vrijednosti temperature t, a kao ordinate vrijednosti tlaka p (sl. 135.). Tlak je zasićenih para sada predočen krivuljom AK, pa kojagod točka P te krivulje, s apscisom OL i ordinatom LP, pokazuje, koliko je tlak LP kod temperature OL. Kod toga tlaka i te temperature postoje i tekućina i pare, jedno nad drugim. Kojagod točka izvan krivulje AK daje dvojku vrijednosti t i p, kod kojih može postojati samo jedan oblik tvari. Točke M, koje su „ispod" krivulje AK (maleni tlakovi!) predočuju plinovito stanje, točke N „iznad" krivulje znače tekućinu.

U zataljenoj staklenoj cjevčici debelih stijena neka je eter (etilni eter), od česti tekućina, a od česti plin. Ako povisimo temperaturu, tlak raste prema zakonu krivulje AK. Pri tome se svojstva tekućega etera i plinovitoga etera sve više zbližuju: umanjuje se razlika njihovih gustoća, a i razlika u lomu svjetlosti, a meniskus (§ 82.) postaje sve više ravan. Kod izvjesne temperature $t = OJ = 194^0$ C sve su razlike nestale, a nestalo je i površine tekućine (Cagniard de la Tour 1822.). Krivulja AK nema dakle točaka, kojih bi apscise premašile vrijednost $OJ = 194^0$, pa toj apscisi pripada krajnja točka krivulje; ta se točka zove kritična točka K, a temperatura OJ kritična temperatura (grč. κρίσις, *odluka*). Kod temperature, koja je viša od kritične, ne može se nikojim stlačivanjem (crta UV!) doći do toga, da bi u isti čas postojala dva oblika tvari. Kod velikih se tlakova može onda doduše tvar zvati tekućinom, ali ne možemo reći, kod kojega tlaka treba ime „plin" zamijeniti sa „tekućina". Taj je prijelaz iz plina u tekućinu postepen i neprimjetljiv.

Da se primjetljivo pretvori plin u tekućinu, treba dakle temperaturu sniziti ispod kritične temperature, a baš to se kod permanentnih plinova isprva nije činilo. Danas poznajemo sve plinovite tvari i u tekućem obliku, pa za najznatnije tobože „permanentne" plinove vrijede ovi podaci:

	kritična temperatura	normalno vrelište
kisik	— 119° C	— 183° C
dušik	— 147	— 196
vodik	— 240	— 253
helij	— 268	— 269

Tekući se zrak čuva u Dewarovim posudama (isp. § 129.), koje treba da su otvorene. Pri tome se zrak neprestance isparuje, pa kako se isparivanjem troši toplina, studen se podržava. Kako se dušik brže isparuje negoli kisik, tekući zrak postaje sve bogatiji kisikom i poprima modrikastu boju. Ako se tekući zrak ulije u posudu obične temperature, nastaje burno isparivanje, otprilike kao da se voda lijeva na vruću ploču štednjaka.

Da se snizi temperatura, koliko treba za likvefakciju plina, ima nekoliko putova. Ako se sisaljkom uklanjaju pare neke tekućine A, tekućina se ohlađuje; spadne li temperatura ispod kritične temperature plina B, može se plin B ohlađivan tekućinom A pod dostatnim tlakom pretvoriti i sam u tekućinu. — Drugi je postupak taj, da se plin pod velikim tlakom ohladi, koliko se dade, a onda ga pustimo, da se brže rastegne; ostatak plina vrši radnju (izvanju), pa se pri tome toliko ohladi, da se može pretvoriti u tekućinu.

Tehnički je osobito znatan onaj postupak likvefakcije, gdje se temperatura snizuje radi „unutarnje" radnje, koju stisnuti plin vrši, jer mu se molekule jedna od druge udaljuju. (Linde, 1895.)

Zrak su pretvorili u tekućinu u većim množinama prvi Wroblewski i Olszewski g. 1883.; likvefakcija helija uspjela je Kamerlinghu Onnesu g. 1908. u Lajdenu, a tekar od nekoliko godina prave tekući helij i drugdje. Našlo se, da ima dvije vrsti tekućega helija: Iznad 2·19° K „He I", ispod te temperature „He II". Taj potonji ima svojstva, kakvih ne poznajemo ni kod koje druge tekućine, poimence unutarnje trenje mu je jedva primjetljivo i tekućina puza preko stijena posude.

Još niže temperature, nego što trebaju za likvefakciju, postignute su s pomoću magnetizma. Zgodna sol stavi se u jak magnet i ohladi, koliko se može običnim načinom; kada se onda magnetske sile uklone, temperatura se još i dalje snizi. Taj postupak predložili su teoretičari, pa se tako došlo g. 1935. do temperature 0·005° K, koja je niža od svih temperatura, što su se ikada u prirodi opažale ili koje se igdje u Svemiru mogu zamišljati. Ta je temperatura na oko vanredno blizu apsolutnoj ništici. Ipak drže, da je potonja nedostiživa. Kako se mjere te niske temperature, ne može se ovdje objasniti.

128. Druge promjene skupnosti. U zatvorenoj posudi neka je tekući ugljikov dvokis i pare njegove. Ako posudu hladimo, pada tlak u skladu sa krivuljom KA (sl. 135.) Kod temperature $OB = -79$°C i tlaka $BA = 5·1$

atmosf. ugljikov dvokis počinje očvršćivati, te kod tih vrijednosti temperature i tlaka stoje „u toplinskoj ravnoteži" plinoviti, tekući i čvrsti ugljikov dvokis. Točka A s koordinatama — 79° i 5·1 atmosf. zove se trostruka točka ugljikova dvokisa, jer pripada tlaku i temperaturi, kod kojih tvar u isti mah može postojati u tri oblika. Odvodeći i dalje toplinu ne ćemo moći sniziti temperature sve dotle, doklegod nije iščezla sva tekućina, te preostao čvrst ugljikov dvokis i pare. Tlak zasićenih para, koje se dotiču čvrste tvari, dan je krivuljom AX, koja u crtnji luči područje para od područja čvrste tvari.

Obični je tlak manji od tlaka, što pripada trostrukoj točki ugljikova dvokisa; zato kod običnoga tlaka ugljikov dvokis ne može biti tekućina, već ga dobivamo kao „snijeg" (Thilorier 1830.) ili t. zv. suhi led. — Trostrukoj točki vode pripada temperatura 0·0075 °C i tlak 4·6 mm pa samo kod tih vrijednosti može voda postojati u tri oblika (led, voda, pare) u toplinskoj ravnoteži.

Kada željezo grijemo, rasteže se, ali kod 910°C stegne se i onda daljnjim grijanjem opet rasteže. Kod 910°C željezo prelazi iz krutoga stanja, u kojemu su atomi na rjeđe poređani, u kruto stanje, gdje atomi čine „gust sklop", te po 4 susjedna atoma možemo zamišljati u tetraedričkom poređaju poput 4 kugle, koje se dotiču.

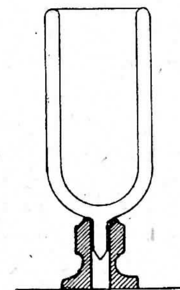
129. Prelaženje topline. Toplina prelazi s jednoga mjesta na drugo prenošenjem, vođenjem i zrakama. O zrakama bit će govor u nauku o valovima. Prenošenje je topline gibanje toplih tvari. Na pr. ako vodu obične temperature grijemo odozdo, donje se česti vode ugriju, specifična im težina postane manja, pa se ugrijana voda diže nad hladnu i nastane miješanje i prenošenje topline.

U prirodi je od silne važnosti prenošenje topline vjetrovima i morskim strujama. — Uzduh propušta velik dio sunčanih zraka, pa se Zemlja od tih zraka ugrije; od nje prima toplinu najniži sloj uzduha, pa se uzduh od Zemlje ugrijeva otprilike kao i voda u posudi.

Ako željezni štap držimo u ruci na jednom kraju, a drugi je kraj štapa u plamenu, naskoro će se cijeli štap toliko ugrijati, da ga moramo pustiti iz ruke. Toplina se u štapu rasprostrla „vođenjem". Toplina „sama od sebe" prelazi od toplijega mjesta tijela na hladnije. Pri tom toplija mjesta gube toplinu to brže, što su veće razlike temperatura. Osobito dobro „vodi toplinu" srebro, a onda redom slijede ovi „dobri" i „loši" vodiči topline: bakar, željezo, olovo, živa, staklo, voda, vodik, zrak.

Prema kinetičkoj teoriji vođenje topline nastaje poradi toga, što je na toplijim mjestima kinetička energija molekularnoga gibanja veća, negoli na hladnijim mjestima; udarcima ili drugim kojim načinom živahnost se gibanja prenosi od mjesta do mjesta, te se jednoliko porazmjesti. — Matematički ispitivao je zadaće o vođenju topline Fourier (1882.) i time je znatno unapredio čistu matematiku.

Temperatura se površine zemaljske utjecajem Sunca mijenja. Ako se odredi srednja vrijednost temperature zemaljske za svaki mjesec, izlazi, da je u mjestima umjerenoga pojasa sjeverne polutke temperatura površine najviša u srpnju, a najniža u siječnju. Te promjene vođenjem utječu na temperature tla ispod površine. Što je veća dubljina, to kasnije slijede skrajnje vrijednosti temperature, pa je u dubljini 4 m najtopliji mjesec listopad, najhladniji travanj, a u dubljini 7 m najtopliji prosinac, najhladniji lipanj. Razlika između najviše i najniže temperature iznosi u dubljini od 10 m otprilike 0·1°. — U Davy-evoj je svjetiljci (1815.), koja služi u ugljenicima, plamen opkoljen kovnom mrežom; mreža odvodi toplinu, pa plinovi što nastaju izgaranjem, izlaze s temperaturom, koja nije tako visoka, da bi mogla nastati eksplozija plinova ugljeničkih. — Uzduh je loš vodič topline; vata, slama, odijelo i t. d. priječe prelaženje topline, jer je u njima uzduh, a taj se uzduh ne može gibati, pa nema ni vođenja ni prenošenja topline. — Na užarenoj kovnoj ploči kaplja vode ima oblik kuglast, kao živa na staklu, te ne vri; vodene pare, što luče kapljicu od ploče, loš su vodič topline. Kad se ploča ohlađuje, najedamput nastane silno vrenje i kap se rasprši. (Boerhave 1732.) Kad je u parnom kotlu premalo vode, stijena koja nije pokrita vodom, može se užariti, pa nastane opisani pojav u velikom i kotao eksplodira. — Dewarova posuda (1980.), koja štiti sadržaj svoj od temperature okoliša, jest posuda dvostruke stijene (sl. 136.), a prostor je između stijena sisaljkom što bolje ispražnjen. U praznom prostoru nema tvari, nema dakle ni vođenja. (Da se ne bi ni toplinskim zrakama gubila toplina, stijene su posrebrene.) „Termosboce". — Da se lakše prenese toplina s nekoga predmeta na uzduh, dodaju se kovni nastavci velikih površina, t. zv. „rebra za hlađenje" (na pr. kod nekih motora, kod peći centralnoga loženja i t. d.).


Sl. 136.

130. Degradacija energije. U § 116. razložilo se, da se trošenjem topline može dobiti radnja. Praktički se primjenjuje taj pojav u kaloričkim strojevima (parostroj i dr.), koji radnju vrše periodski. Kod tih strojeva toplina se nikada ne troši sasvim na radnju, nego se vazda znatan dio topline bez koristi potrati. Ako se u parostroju od svake kgkal topline, što se dobije izgaranjem ugljena, 0·1 kgkal potroši na radnju, a 0·9 kgkal ode bez koristi, nije to ni loš parostroj. Razlog tome traćenju topline nije samo taj, što ne možemo spriječiti, da se toplina gubi prelazeći na okoliš, nego je to traćenje također posljedica prirodnog zakona, koje ne možemo nikako ukloniti.

Do te je spoznaje došao Sadi Carnot (1824.). Nijedan kalorički stroj ne bi mogao raditi, kad bi temperatura svagdje u stroju bila jednaka. Da se uklone iz parnoga valjka u parostroju vodene pare, koje su svršile svoj posao, treba ih u kondenzatoru zgusnuti; dakle treba da bude temperatura vode u kondenzatoru niža od temperature u parnom kotlu. I najviša je temperatura za nas bez koristi, ako nemamo u isti mah i hladnijega spremišta topline. Prema tomu je s ljudskoga gledišta traćenje energije, kada toplina prelazi na pr. vođenjem iz toplijega tijela na hladno; temperature se naime pri tome izjednačuju, pa dok bi se bila mogla toplina prije spomenutoga prijelaza iskoristiti za dobivanje radnje, poslije prijelaza nije to više moguće. Toplina, što je prešla iz toplijega tijela, nije se doduše izgubila, jer koliko je u toplijemu tijelu nestalo topline, toliko se u hladnom pojavilo, ali pogledom na dobivanje radnje, ta je toplina za nas izgubila

vrijednost. Kako se u prirodi svagdje temperature sve više izjednačuju, sve više nestaje prilike, da bi toplina mogla vršiti radnju. U tom se smislu vrijednost topline snizuje, te se neprestance zbiva „d e g r a d a c i j a“ toplinske energije (lat. *degradatus, ponižen.*).

Kada parostroj paru iz parnoga valjka istiskuje, stvara se toplina. Tu toplinu prima kondenzator i od nje nema više koristi. Tako isto se i kod drugih kaloričkih strojeva u svakoj periodi rada jedan dio topline bez koristi prenese na hladnije spremište. Ako neki kalorički stroj, koji radi sa dva spremišta topline različitih temperatura, u svakoj periodi svoga rada oduzme toplijemu spremištu toplinu Q_1 kg*m, hladnijemu spremištu preda Q_2 kg*m, a izvrši radnju R kg*m, radnja nastaje otuda, što se toplina umanjila, te je $Q_1 > Q_2$. Da se ništa topline nije izgubilo na okoliš, bilo bi $R = Q_1 - Q_2$ (zakon energije!). Kalorički stroj radi to bolje, što je veći „stupanj djelovanja“

$$\frac{R}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} < 1.$$

Carnot je radnju kaloričkoga stroja isporedio sa radnjom vodopada. Kako kod kaloričkoga stroja trebaju dva toplinska spremišta različitih temperatura, tako kod vodopada postoje dva spremišta vode različitih visina. No ne valja množinu topline isporediti s množinom vode, jer dok se množina vode padom ne umanjuje, topline nestaje u kaloričkom stroju toliko, koliko nastane mehaničke energije.

Carnot je objasnio, kako bi morao kalorički stroj raditi, da mu stupanj djelovanja bude što veći. Ujedno je upoznao, da je stupanj djelovanja toga teoretičnoga stroja zavisan **samo o temperaturama** o b a d v a j u t o p l i n s k i h s p r e m i š t a, b e z o b z i r a n a t o, v r š i l i r a d n j u v o d e n a p a r a, v r u ć i u z d u h i l i d r u g a t v a r (C a r n o t o v p r i n c i p). To otkriće navelo je W. T h o m s o n a (= L o r d K e l v i n, 1848.), da uvede ljestvicu temperatura nezavisnu o izboru termometarske tvari. (§§ 111., 114.). Neka je T_1 °K temperatura toplijega spremišta, T_2 °K temperatura hladnijega spremišta.

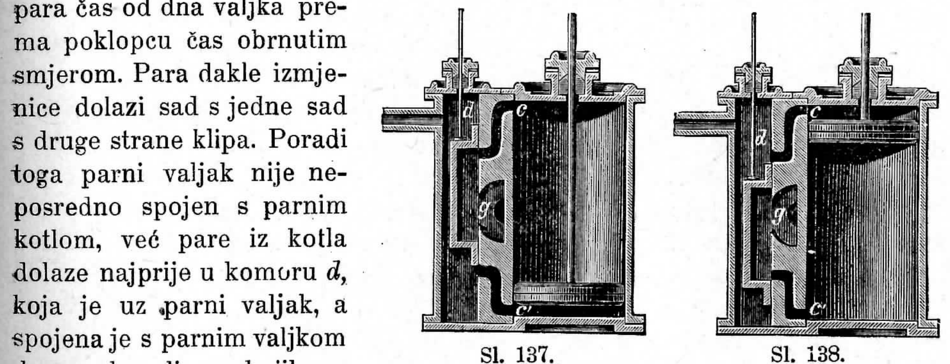
Termodinamička apsolutna ili Thomsonova ljestvica baš je t a k o o d a b r a n a, da za stupanj djelovanja Carnotova stroja izlazi jednostavna formula

$$\frac{R}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Prema toj formuli s v a bi se toplina Q_1 mogla samo onda pretvoriti u radnju $R = Q_1$ kada bi hladnije spremište imalo temperaturu $T_2 = 0$ (apsolutna 0!). U tako određenoj skali nema negativnih temperatura, jer iz $T_2 =$ neg. slijedilo bi, da je $R > Q_1$, što ne može biti. Gornja jednadžba ne određuje još v e l i č i n e stupnja. Zato se dodaje zahtjev, da u termodinamičkoj skali ima biti razmak od ledišta do vrelišta = 100°. Onda mjerenja i račun daju, da je temperatura ledišta 273·1 °K (vrelište 373·1 °K).

Što toplina ne će da ide od hladnijeg tijela na toplije, na oko protuslovi kinetičkoj teoriji topline. Po toj je teoriji toplina mehanički pojav, a mehanički su pojavi o b r a t l j i v i. Što se time želi reći, neka objasne dva primjera. Kad tijelo bacimo vertikalno u vis, tijelo obrnutim redom stizava u ista mjesta kao i kod prostoga pada i poprima brzine jednake i protivne brzinama padanja; kad bi se mogle u neki čas svima tjelesima našega sunčanoga sustava brzine prometnuti u jednake i protivne brzine, sunčani bi sustav od toga časa svoju povijest proživljavao obrnutim slijedom. Ta obratljivost treba dakle da vrijedi i za pojav gibanja molekula. Neka je prošlo nešta topline s toplijega tijela na hladnije; kad bi se onda mogle brzine svih molekula izvrnuti u jednake, protivne brzine, događaji bi potekli obrnutim slijedom i toplo bi se tijelo ugrijavalo od hladnijega. Čini se dakle prema kinetičkoj teoriji, da toplina m o ž e prelaziti s hladnijega tijela na toplije, dok iskustvo uči, da to ne može biti. Da tu nema protuslovlja, pokazao je B o l t z m a n n. Među svima nebrojenim molekularnima gibanjima, što ih možemo zamisliti u dva tijela određenih temperatura, silna je većina takova, da im je posljedica prelaženje topline iz toplijega tijela na hladnije, a sasvim ih malo ima, koja bi se razvijala u protivnom smjeru. Potonja je vrst molekularnih gibanja prema tome vanredno malo „v j e r o j a t n a“, dakle je silno nevjerojatno ili praktički nemoguće, da bi toplina sama od sebe prelazila s hladnijega tijela na toplije.

131. Parostroj na klip. U p a r n o m s e k o t l u voda grijanjem pretvara u pare, a pare izvode radnju u p a r n o m v a l j k u. Sl. 137. i 138. prikazuju u prorezu parni valjak i u njemu k l i p i l i s t a p a l o, što ga tjera para čas od dna valjka prema poklopcu čas obrnutim smjerom. Para dakle izmjenice dolazi sad s jedne sad s druge strane klipa. Poradi toga parni valjak nije neposredno spojen s parnim kotlom, već pare iz kotla dolaze najprije u komoru *d*, koja je uz parni valjak, a spojena je s parnim valjkom dvama kanalima, kojih se jedan svršava pri dnu *c'* valjka, drugi pri poklopcu *c*. P o m i c a l j k a otvara ove spojeve izmjenice i u zgodan čas. Kad je klip stigao do dna, treba da para kod *c'* unilazi; onda je para na strani poklopca baš izvršila svoju radnju, pa se ispod pomicaljke kroz otvor *g* pušta u k o n d e n z a t o r ili napolje, gdje se kod niske temperature pretvara u vodu. Pravocrtnim se gibanjem klipa s pomoću s p o j n e m o t k e i r u č i c e izvodi vrtnja z a m a š n j a k a i strojeva, koji se parostrojem pokreću. Tom se vrtnjom ujedno vrše i radnje u samom parostroju (gibanje pomicaljke, sisanje vode i uzduha iz kondenzatora i t. d.).



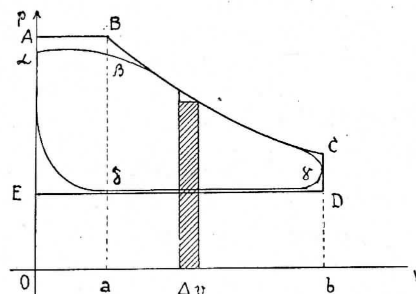
Sl. 137. Sl. 138.

Para tjerajući klip n i j e kroz c i j e l o vrijeme pomicanja klipa zasićena; pomicaljka zatvori svezu s kotlom na pr. već onda, kad je klip prevalio tekar $^1/_3$ svoga puta. Kad se obujam pare povećava, a ne može dolaziti

„svježa“ para, tlak se umanjuje i temperatura pare pada. Poradi toga temperatura se pare iza dovršena rada ne razlikuje mnogo od temperature kondenzatora, pa ne će nastati nekorisno i nepotrebno prelaženje topline. Kažemo, da parostroj radi s ekspanzijom (lat. *expando*, *rasprostirem*).

Parostroj, kako ga evo opisasmo, izumio je Watt (patenti iz g. 1769.). Prema starijim izumima ove ruke osobito je znatan napredak, što je Watt odijelio kondenzator od valjka. Uz to je u starijih strojeva klip vršio radnju samo u jednom smjeru svoga gibanja, dok na povratku nije radio, te je gibanje bilo manje jednolično.

U sl. 139. prikazan je rad parostroja grafički. Za apscise uzete su vrijednosti obujma v, što ga zapremaju pare na jednoj strani klipa, kao ordinate tlakovi para p. Neka je OA tlak para u parnom kotlu, OE tlak u kondenzatoru. Pare neka ulaze u parni valjak, dok obujam v ne naraste do vrijednosti Oa. Do toga je časa tlak stalan i predočen pravcem AB usporednim s osi apscisa. Kad se prekine spoj parnoga valjka s kotlom, pare se rastežu i tlak im pada, što prikazuje krivulja BC Kad je obujam $v = Ob$, otvori se parama put u kondenzator i tlak spadne na vrijednost $bD = OE$. Kad se obujam v umanjuje i pare kondenziraju, vlada u valjku tlak kondenzatora, što prikazuje crta DE; a kad se opet načini spoj sa kotlom, tlak naraste na vrijednost OA. — Uistinu umjesto crte $ABCDEA$ vrijedi krivulja $\alpha\beta\gamma\delta\alpha$, koja je svagdje obla. Budući da se jedan dio tlaka potroši na tjeranje para kroz dovodne cijevi, ne će tlak u valjku doseći visine, što je ima u kotlu, nit će spasti do tlaka kondenzatora. Umjesto preloma kod E imamo obli dio $\delta\alpha$, jer se navlaš za vremena prekine spoj s kondenzatorom, tako da se para, što je u valjku preostala, stisne i ugrije. Tom se „kompresijom“ sprečava, da se ne bi svježe pare, što će doći u valjak, od česti ohladile i kondenzirale; u drugu ruku parostroj uz kompresiju radi mirnije.



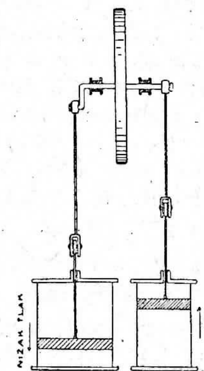
Sl. 139.

Ako uz tlak para p kg*/m² obujam naraste za Δv m³, radnja je $p \cdot \Delta v$ kg*m (isp. § 116.). Ta je radnja u slici predočena uskim šrafiranim pravokutnikom. Dok obujam raste, radnja je pozitivna, dakle je sva pozitivna radnja dana likom $\alpha\beta\gamma bO$. Dok se obujam umanjuje, radnja je para negativna, te je sva negativna radnja predočena likom $\alpha\delta\gamma bO$. Sveukupna je radnja za vrijeme jedne periode $\alpha\beta\gamma bO - \alpha\delta\gamma bO = \alpha\beta\gamma\delta\alpha$. To vrijedi za radnju para na jednoj strani klipa; pare na drugoj strani izvode gotovo jednaku radnju. (Indikator; isp. § 50.)

Vrijednost je kondenzatora u tom, što je u njemu tlak malen, te na pr. kod 46 °C vlada samo tlak 0·1 atmosfere (isp. tablica § 123.). Para treba dakle da tjera klip protiv malenoga tlaka umjesto da ga gura protiv tlaka uzduha. Primjenjujući kondenzator snizujemo temperaturu kondenziranih para, te dobivamo veći stupanj djelovanja (isp. pređ. §). Za istim se ciljem ide, kad se temperatura u parnom kotlu uzimlje visoka; temperatura 200 °C već je vrlo visoka, jer joj pripada tlak para 15 atmosfera. („Parostroj visokoga tlaka“.)

Gdjekada se parostroj načini sa dva valjka, te se onda obično udesi, da titraj klipa u jednom valjku zaostane za ¼ titraja za titrajem klipa u drugom valjku; gibanje obadvaju klipova prenosi se na istu os vrtnje. Kod parostroja sa tri valjka titraji su razmaknuti za ⅓ titraja.

I parostroj s dvostrukom ekspanzijom ima dva valjka, ali kroz njih ide para redom, t. j. najprije kroz jedan valjak onda kroz drugi. Drugi je valjak širi od prvoga (sl. 140.). U prvom se valjku para ne rastegne dotle, da bi joj temperatura i napetost spale na vrijednosti, što vladaju u kondenzatoru. Tek u drugom se valjku para rastegne do kraja. Svrha je tome postupku, da u istom valjku ne budu prevelike razlike temperature, te da ne bude premnogog prelaženja topline.


Sl. 140.

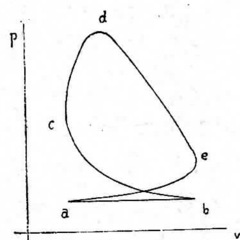
Što se stupnja djelovanja parostroja tiče, izvest ćemo ovaj račun. Neka je tlak para u kotlu 200 °C ili 473 °K, u kondenzatoru 46 °C ili 319 °K. Kad bi Carnotov teoretički stroj radio s tim temperaturama, bio bi stupanj djelovanja (isp. pređ. §) (473 — 319) : 473 = 0·33. Dakle i sam teoretski stroj pretvorio bi samo otprilike ⅓ topline u mehaničku energiju, dok stupanj djelovanja parostroja daleko i za tim brojem zaostaje. Kako 1 kg najboljega ugljena izgaranjem daje 8000 kgkal, što je ekvivalentno sa 8000·427 kg* m = 3416000 kg* m, ne valja od 1 kg ugljena očekivati ni 1000000 kg*m radnje.

Druge uredbe i pojmovi znatni za parostroj spomenuti su na drugim mjestima knjige i to upravljač § 37., indicirana KS i korisna KS § 51., zamašnjak § 65., ventil sigurnosti § 72., vodokaz § 76., injektor § 83.

132. Eksplozijski i srodni motori. Kod motora, o kojima će se sada govoriti, izvodi se kemijski pojav, koji stvara toplinu, u samom „radnom“ valjku; kod toga nastaje visoka temperatura (na pr. do 2000 °C), pa je i stupanj djelovanja osobito velik, na pr. 2 puta veći negoli u parostroja.

Kod benzinskog se motora stlačuje smjesa uzduha i benzinovih para, onda se električnom iskrom dovede ta smjesa do eksplozije, pa se velikim tlakom plinova eksplozije goni klip, koji vrši radnju.

Motori ove ruke mogu raditi u četveromahu, kako je grafički predočeno u sl. 141., gdje su opet apscise obujmovi, ordinate tlakovi. Jedan je „krug“ rada dovršen, kad klip načini 2 potpuna titraja, t. j. dva „maha“ u jednom smjeru, a dva u protivnom.



Sl. 141.

1. mah →, obujam raste, s i s a n j e; radni valjak siše u sebe eksplozivnu smjesu; tlak je stalan (*ab*);
2. mah ←, obujam se umanjuje, k o m p r e s i j a: usisana se smjesa stlačuje i time ugrije (crta *bc*);
3. mah →, obujam raste, u p a l a; komprimirana se smjesa upali; tlak naraste i plin vrši radnju (crta *cde*);
4. mah ←, obujam se umanjuje, i z g o n; ostaci izgaranja izbace se napolje (crta *ea*).

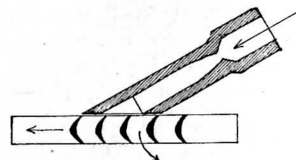
Klip dakle radi samo u 3. mahu. Da se ipak dobije jednoličan rad, grade strojeve sa v i š e valjaka.

Valjak eksplozijskoga motora treba hladiti; zato je opkoljen plaštem, kojim teče hladna voda. Gdje to ne može biti, izvodi hlađenje struja uzduha.

Među najbolje motore ide D i e s e l o v (1893.), koji prave poput parostroja i za najveći broj KS. U radnom se valjku čist uzduh ugrije kompresijom do temperature kojih 700 °C; tekuće gorivo, što se onda utiskuje u valjak, kod te se temperature bez druge pomoći upali, a kako se gorivo utiskuje p o s t e p e n o, tlak je kroz neko vrijeme gotovo stalan, pa krivulja tlaka u najvišim točkama nije šiljata, već plosnata. Dieselov se motor može goniti i gorivom manje vrijednosti („motor sa sirovim uljem").

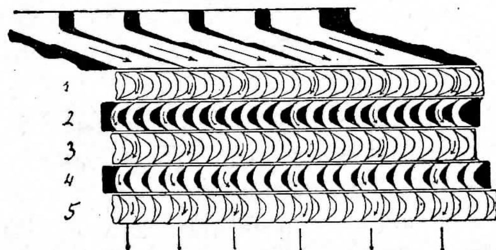
Motori su ove ruke raznovrsni, a izumi u njima sadržani nicali su postepeno, na pr. „vodeni plašt" 1833., kompresija 1838., električka paljba 1860., prvi opis četveromaha 1862. (B e a u d e R o c h a s). H u y g e n s je zamislio motor gonjen eksplozijama baruta (1673.).

133. Parna turbina. Kod parne turbine snaga pare n e p o s r e d n o izvodi vrtnju. U mnogom su parne turbine srodne turbinama gonjenima vodenom snagom (§ 86.). Kod parne turbine, koju je izumio d e L a v a l (1887.), kolo ima na obodu lopatice ili „pera", a vrti se, jer se od pera odrazuju mlazovi vodenih para, što izilaze iz dulaca osobita oblika. U sl. 142. prikazan je prorez dulca i dio oboda. Tlak u parnom kotlu podjeljuje mlazu u dulcu sve veću brzinu. Tlak mlaza u dulcu pada, te je na izlazu dulca jednak tlaku, što vlada u kondenzatoru. Brzina je mlaza silna, pa je prema tome i brzina oboda velika, do 500 m/sek. Ta je turbina poput Peltonove (§ 86.) „akciona" turbina.



Sl. 142.

Da se dobije vrtnja m a n j e brzine, uzimlje C u r t i s (1897.) umjesto jednoga kola nekoliko njih. U sl. 143. prikazani su obodi 5 kola; 1., 3. i 5. kolo čvrsto su spojena, pa se vrte, 2. i 4. kolo miruju. Iz niza dulaca dolaze pare na pera 1. kola, ali odrazom izgube samo dio brzine; na perima 2. kola pare se odraze i dobiju opet zgodan smjer, da mogu udariti u pera 3. kola i t. d. U prostoru, u kojemu su ta kola, nije još tlak smanjen na konačnu vrijednost, nego pare izlaze odavle opet kroz dulce, te nanovo dobiju brzinu, pa djeluju na drugi sustav kola, koji je s prvim čvrsto spojen i t. d.



Sl. 143.

P a r s o n s izumio je parnu turbinu (1884.), koja nema dulaca, nego je „potpuno gonjena" „akciono-reakciona" turbina (§ 86.).

Parne turbine uzimlju malo prostora, rade mirno, a poradi velike brzine zgodne su za pogon generatora električne struje.

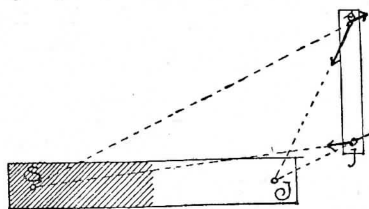
III. ELEKTRICITET I MAGNETIZAM

1. Magnetizam

134. Magnet. Ako ocalni štap krajevima svojima hvata komadiće željeza, zovemo ga „magnetom". Ako takav štap u horizontalnom položaju tako objesimo, da se može lako vrtjeti oko vertikalne osi, namjestit će se otprilike u smjer sjever-jug. Ona strana štapa, koja je okrenuta prema sjeveru, zove se „sjeverna strana" magneta, dok se druga zove „južna strana". Ima magneta i drugoga oblika, na pr. magnetska „igla", potkova i t. d., a i od drugih tvari. (Kao „prirodni" magnet nalazimo rudu magnetovac; ime „magnet" dolazi valjda od grada Magnezije u Maloj Aziji, gdje ima te rude.)

Ako sjevernoj strani magnetičkog štapa, koji je dosta slobodno obješen, približimo sjevernu stranu drugoga magneta, primjetit ćemo odbojnost. Lako se utvrđuje pravilo, da istoimene strane dvaju magneta jedna drugu odbijaju, raznoimene privlače. Uzrok magnetskom djelovanju zovemo „magnetizmom", te u prvi mah pomišljamo, da na sjevernoj strani magneta ima „sjeverni magnetizam", na južnoj „južni magnetizam", a istoimeni magnetizmi da se odbijaju, raznoimeni privlače. I za magnetičke sile vrijedi zakon, da je sila jednaka i protivna protusili: ne djeluje samo magnet na željezo, nego i željezo na magnet.

135. Coulombov zakon. Da što jednostavnije shvatimo djelovanje magneta, pomišljamo sjeverni magnetizam njegov združen u jednoj jedinoj točki, „sjevernom polu". Magnet sa polovima *S* i *J* djeluje na magnet, kojemu su polovi *s* i *j*, sa dvije privlačne i dvije odbojne sile (sl. 144.). Što je manji razmak polova, to je veća sila, kojom djeluju jedan na drugi. Može se desiti radi zgodnoga namještaja, da je jedna sila toliko veća od ostalih, da se na potonje ne trebamo ni obazrijeti. Ako se pri tom jedan


Sl. 144.

magnet nalazi na zdjelici vage, možemo odvagnuti onu najznatniju silu i odrediti je u gramima ili dinima. Tako se može naći i zakon, po kojemu se mijenja međusobno djelovanje dvaju polova, kad mijenjamo njihov razmak.

Odbojnost dvaju sjevernih polova stoji do njihovih „jakosti" i razmaka. Kada velimo, da polovi *s* i *s'* imadu jednaku jakost? Onda, ako pol *s* odbija treći neki pol *S* onolikom silom, kolikom bi *s'* odbijao *S* u jednakom razmaku. Ako bi potonja sila bila 2 puta, 3 puta . . . . veća od prve, reći ćemo, da je pol *s'* 2 puta, 3 puta . . . . jači od pola *s*. Za južni pol *j* kažemo, da mu je jakost jednaka jakosti sjevernoga pola *s*, ako privlači sjeverni pol *S* onolikom silom, kolikom ga *s* odbija. Jakost pola može se brojem izraziti, ako odredimo, koliko je puta taj pol jači od pola, kojega smo jakost odabrali za jedinicu jakosti.

Za „jakost pola" upotrebljavaju se i nazivi „množina magnetizma" a i „magnetička masa".

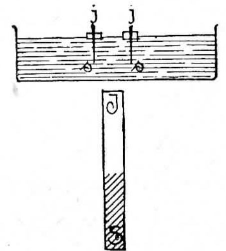
Sila, kojom djeluju polovi jedan na drugi, razmjerna je jakosti jednoga pola i jakosti drugoga pola, a obrnuto je razmjerna kvadratu razmaka polova. (Coulomb 1785.) Ako je jakost jednoga pola μ, jakost drugoga μ_1, r razmak njihov, p sila, glasi netom izrečeni zakon u matematičkom ruhu

$$p = k \frac{\mu \mu_1}{r^2},$$

gdje je k konstanta razmjernosti; njezina vrijednost stoji do toga, kako su odabrane jedinice za silu, jakost pola i dužinu. Uz zgodnu primjenu predznakova vrijedi jedna te ista formula za privlačnost i odbojnost. Zato se jakost sjevernoga pola uzimlje s pozitivnim predznakom, jakost južnoga s negativnim, k pozitivno. Onda prema formuli izlazi sila između istoimenih polova (+ i + ili — i —) pozitivna, sila između raznoimenih negativna; odbojnu silu valja dakle bilježiti s pozitivnim znakom, privlačnu s negativnim.

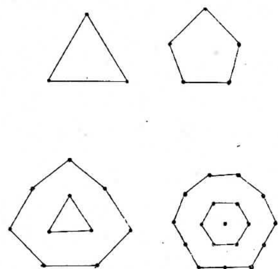
Coulombov je zakon nalik na Newtonov zakon opće gravitacije; sadržaj mu je raznovrsniji, jer vrijedi za privlačne i odbojne sile, dok je gravitacija vazda privlačna sila.

Lijep primjer djelovanja magnetičkih sila pružaju pokusi M. Mayera (1878.). Iznad vertikalnog magnetičkog štapa (sl. 145.) nalazi se posuda s vodom, a u njoj plivaju u uspravnom namještaju dvije jednako magnetizirane šivaće igle, koje su utisnute u komadiće pluta. Svima magnetima neka je južna strana iznad sjeverne. Igle se odbijaju (zašto?), u drugu ruku štap nastoji igle zbližiti (zašto?). Uzme li se umjesto dvije igle više njih, igle se pravilno poređaju, te odozgo gledane pružaju simetrične likove mnogokutova koji jedan drugi opkoljuju. (Sl. 146.)


Sl. 145.

136. Jedinica jakosti pola. Jedinicu jakosti pola određujemo oslanjajući se na jedinice mehaničke (Gauss 1833.). Jakost je pola $\mu = 1$, ako

pol odbija jednako jak pol $\mu_1 = 1$ u daljini $r = 1$ cm silom 1 din. Stave li se ove vrijednosti u jednadžbu Coulombova zakona, izilazi $1 = k \cdot 1 \cdot 1 : 1^2$ dakle $k = 1$. Kraj takovoga izbora jedinica Coulombov zakon dobiva jednostavni oblik



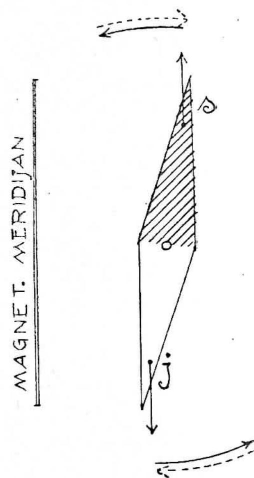
Sl. 146.

$$p = \frac{\mu \cdot \mu_1}{r^2}.$$

Ako se dva sjeverna pola jednake jakosti u razmaku 4 cm odbijaju silom 25 dina ($\doteq$ 0·025 g*), njihova je jakost $x = 20$, jer je $25 = \frac{x\,x}{4^2}$.

Određujući jedinicu jakosti pola spomenusmo centimetar i din. Budući, da su to jedinice c-g-s—sustava, to kažemo i za našu jedinicu jakosti pola, da pripada c-g-s—sustavu. Ima cio niz drugih jedinica u nauci o elektricitetu i magnetizmu, koje se nadovezuju na spomenutu jedinicu jakosti pola. Sve one čine elektromagnetski c-g-s—sustav jedinica.

137. Magnetsko polje. Prostor u okolišu magneta zovemo „magnetskim poljem". Ako magnetski pol dovedemo redom u različite točke magnetskoga polja drugih magneta, polje njihovo ne će svagdje jednakom silom djelovati na pol. Ako u točki A polje djeluje na pol + 1 silom h dina, kažemo, da je „jakost polja" h ersteda (naziv odabran u počast Ørstedu); polje h ersteda djeluje na pol μ silom $h\,\mu$ dina. Smjer sile, kojom polje djeluje na sjeverni pol, zove se smjer polja. Jakost polja često se predočuje geometrijski kao dužina određene veličine i smjera, ona se može poput sile rastaviti u komponente po zakonu paralelograma.



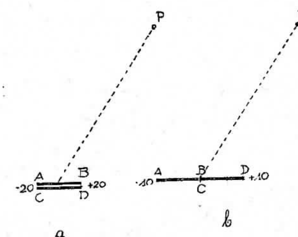
Sl. 147.

Zemlja je magnet i mi se vazda nalazimo u polju toga magneta. Horizontalna magnetska igla, koja se može vrtjeti oko vertikalne osi, namješta se utjecajem Zemlje u određeni smjer. Vertikalna ravnina položena kroz taj smjer zove se magnetski meridijan. Ako u misli iglu nadomjestimo jednim sjevernim i jednim južnim polom, možemo reći, da magnetsko polje zemaljsko tjera sjeverni pol S igle otprilike prema sjeveru, južni J prema jugu i to smjerovima, koli leže u magnetskom meridijanu. Kad se igla pusti iz bilo kojeg položaja (sl. 147.), polje će je staviti u njihanje, pa će se ona najposlije ustaviti u svom položaju ravnoteže u magnetskom meridijanu. To njihanje mehanički

nalikuje njihanju njihala pod utjecajem teže; kako se u običnog njihala vrijeme njihanja skrati, ako se poveća akceleracija sile teže, tako će se i magnetsko njihalo brže njihati tamo, gdje je polje jače. Tako se može njihanjem magnetske igle utvrditi, je li magnetsko polje na raznim mjestima jednake jakosti ili nije. Ako zgrada, u kojoj se nalazimo, nema mnogo željeza, jakost je i smjer magnetskoga polja zemaljskoga diljem cijele zgrade jednaka. Magnetsko polje, koje ima svagdje isti smjer i jednaku jakost, zove se jednomjerno ili homogeno.

Ako na plosnat čep od pluta, koji pliva na mirnoj vodi, oprezno položimo magnetsku iglu u smjeru, priklonjenom spram magnetskoga meridijana, pluto s iglom ne će izvoditi drugo kakvo gibanje, osim njihanja i pri tome će se vrtjeti oko vertikalne osi sad u jednom sad u drugom smjeru. Od tuda zaključujemo, da gibanje ovdje nastaje utjecajem sila dvojica, t. j. dviju jednakih sila, kojima su smjerovi protivni (§ 59.). No budući da je magnetsko polje Zemlje jednomjerno, mogu one dvije sile samo zato jednake biti, jer su sjeverni i južni pol igle jednako jaki. Sjevernoga magnetizma ima dakle onoliko, koliko i južnoga, a pogotovu nema magneta, koji bi imao samo jednu vrst magnetizma.

138. Magnetski momenat. Ako tik kratkoga magnetskoga štapa AB (sl. 148.a) s polovima + 10 i — 10 u misli položimo jednak štap CD jednako magnetiziran, tako da se istoimeni polovi podudaraju, dvostruki će štap djelovati kao magnet, koji ima polove + 20 i — 20. Ako pridodani magnet pomaknemo usporedno, tako da mu se južni pol C sastane sa sjevernim polom B prvoga magneta (sl. 148. b), utjecaj se na vrlo udaljen pol P ne će promijeniti, jer se ni razmak te točke od magneta nije gotovo ništa promijenio. Pomakom dobiven je magnet AD, kojemu je dužina 2 puta veća od dužine magneta AB ili CD, a polovi mu A i D imadu jakost, koja je polovica jakosti pola dvostrukoga magneta u prešašnjem slučaju (u točki B ili C sjedinjeni su sada pol + 10 i pol — 10, pa se njihovi učinci na pol P uništavaju). Izlazi dakle, da magnet djeluje na udaljenu točku onolikom silom, kolikom bi djelovao magnet dvostruke dužine, kad bi mu polovi imali polovicu jakosti; jednako bi djelovao i magnet trostruke dužine s trećinkom jakosti pola, i t. d. U svih je tih magneta umnožak jakosti sjevernoga [južnoga] pola i razmaka polova jednak; zovemo li taj umnožak magnetskim momentom, možemo reći, da magneti jednakih momenata izvode u ovećim daljinama jednaka magnetska polja.



Sl. 148.

Da se stvar jednostavnije prikaže, uzeto je ovdje kanda su polovi na krajevima magneta, dok je razmak polova u istinu manji.

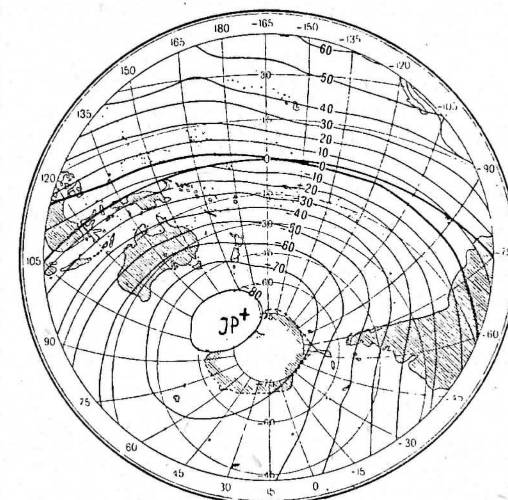
Magnetski momenat ne treba smiješati s pojmom momenta ustrajnosti (§ 65.) ni s momentom sile (§ 60.). Riječ „momenat“ u tim nazivima ne upućuje ni na kakvo drugo zajedničko obilježje spomenutih pojmova, van da su oni u svojim područjima vrlo važni.

139. Magnetsko polje zemaljsko. Smjer magnetskog polja zemaljskog leži u magnetskom meridijanu. Ako poznajemo magnetski meridijan i ako znamo, koliko je smjer polja priklonjen prema horizontalnoj ravnini, smjer je polja određen. Priklon magnetskog meridijana prema geografskom zove se d e k l i n a c i j a. Deklinaciju određujemo magnetskom iglom, koja se može vrtjeti oko vertikalne osi; takva se igla zato zove d e k l i n a t o r n a. Ako je sjeverni pol mirne deklinatorne igle zapadnije negoli os, deklinacija se zove „zapadna“, inače „istočna“. — Priklon smjera magnetskoga polja zemaljskog prema horizontalnoj ravnini zove se i n k l i n a c i j a. Inklinaciju određujemo inklinatornom iglom; to je magnetska igla, koja se može vrtjeti oko horizontalne osi, koje ide težištem igle, a na igli je okomita; os je namještena tako, da igla bude u magnetskom meridijanu. Budući da os prolazi težištem igle, sila teže ne utječe na namještaj igle. Ako se sjeverni pol inklinatorne igle namjesti niže od osi, bilježimo inklinaciju pozitivnim znakom, inače negativnim.

Jakost I magnetskog polja zemaljskog rastavljamo u horizontalnu komponentu H i u vertikalnu komponentu. Kad je poznata horizontalna komponenta H i kut inklinacije i, može se prema zakonu paralelograma izračunati jakost polja I iz pravokutnoga trokuta, kojemu je hipotenuza I, po formuli $I = H/\cos i$.

Tri veličine 1.) deklinacija, 2.) inklinacija i 3.) horizontalna komponenta jakosti polja određuju posvema magnetsko polje zemaljsko. U Zagrebu je početkom g. 1940. deklinacija $2^0 57'$ zapadna, inklinacija $+ 61^0 22'$, $H = 0{\cdot}2$ ersteda. Svrha je magnetičkih opažanja, da se te veličine odrede za što više mjesta. Da se zorno predoči vrijednost deklinacije na različitim mjestima površine zemaljske, crtaju se na zemljovidu krivulje, koje spajaju mjesta jednake deklinacije; zovu se i z o g o n e (ἴσος, *jednak*; γωνία *kut*). I z o k l i n e spajaju mjesta jednake inklinacije (sl. 149.). Točke, u kojima se inklinatorna igla namješta vertikalno, te je u njima $H = 0$, zovu se m a g n e t s k i p o l o v i z e m a l j s k i, gdje ime „p o l“ ima drugo značenje negoli u § 135.; u slici istaknut je magnetski južni pol *JP* sa 73^0 južne širine i 154^0 istočne dužine i inklinacijom -90^0; na magnetskom je sjevernom polu sa 70^0 sjeverne širine i 97^0 zapadne dužine (Kanada, Boothia Felix) inklinacija $+ 90^0$. U blizini polova i z o k l i n e o b u h v a t a j u polove, dok se i z o g o n e u polovima s a s t a j u.

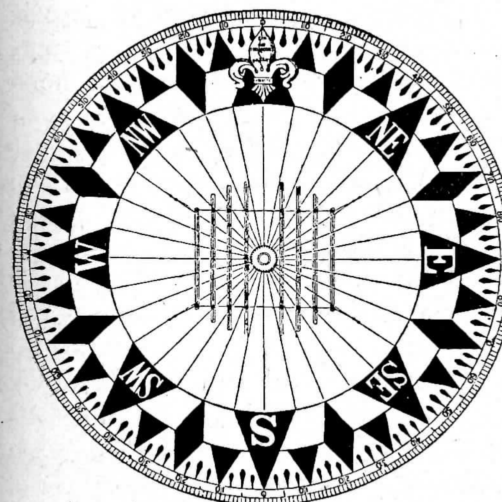
Magnetska igla upotrebljava se — poimence u brodarstvu — za određivanje smjera. U b u s o l i (talij. „*kutija*“) na vertikalnoj je osi namještena horizontalna magnetska igla. K o m p a s (lat. *cum, sa*; *passus, korak*) ima na vertikalnoj osi t. zv. v j e t r u l j u ili r u ž u v j e t a r a (sl. 150.); to je horizontalna laka ploča, na kojoj su označeni smjerovi neba, a nosi na donjoj strani nekoliko usporednih magnetskih štapića; pokazalo se, da se skup usporednih magnetića može učiniti jače magnetičnim negoli jednako težak pojedinačan magnet. Imena za Sjever, Istok, Jug i Zapad označena su početnim svojim slovima, a ta su



Sl. 149.

N	N	N
u Engleza W E,	u Nijemaca W O,	u Francuza O E.
S	S	S

Razmještaj magnetskoga polja zemaljskoga htjedoše isprva tumačiti, pomišlju, da je Zemlja jak magnet sa dva pola; no pokazalo se, da je polje zamršenije, nego što bi odatle slijedilo.

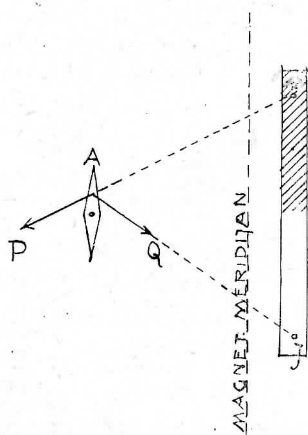


Sl. 150.

Magnetsko se polje Zemlje neprestance mijenja. Najprije se to opazilo kod deklinacije (u 17. vijeku). U Londonu bila je deklinacija g. 1580. 11^0 istočno, dok je g. 1820. iznosila 24^0 zapadno. A m u n d s e n je boraveći g. 1093.—1905. u okolišu sjevernoga magnetskoga pola utvrdio pomicanje toga pola. Uz ove „sekularne“ promjene (lat. *saeculum, dugi niz godina*), u kojima se nije našla pravilnost, ističu se „dnevne“ promjene s periodom od 1 dana; možemo polje zemaljsko zamisliti sastavljenim od jakoga polja, koje u Zemlji miruje i od slabijeg „dnevnog“ polja, koje miruje relativno spram Sunca; kojagod točka Zemlje ima u kojegod doba onakvo dnevno polje, kakvo je u istočnijim točkama na istom usporedniku vladalo već

prije, u jednako doba dana. Uostalom se dnevno polje mijenja s godišnjim dobama („godišnje“ promjene).

Magnetske su smetnje ili perturbacije neočekivane, brze i znatne promjene magnetskog polja zemaljskog, kojima je tok vrlo nepravilan. U nekoliko se minuta znade pri tom daklinacija promijeniti za više stupnjeva. Osobitost je smetnja, da se na cijeloj Zemlji javljaju istodobno. Statističkim se ispitivanjem pokazalo, da su smetnje češće, kad ima na Suncu pjega, te postoji ista periodičnost za magnetičke smetnje, koja i za sunčane pjege; osjekom svakih 11·8 godina vraća se maksimum sunčanih pjega i maksimum smetnja. S magnetskim su smjetnama u svezi električne struje u Zemlji, koje kod jakih smetnja znadu toliko ojačati, da sprečavaju brzojavni saobraćaj (kod običnoga se brzojava kao jedan vod struje upotrebljava Zemlja). Mnogima smetnjama odgovaraju i mnoge pojave polarnih svjetlosti.



Sl. 151.

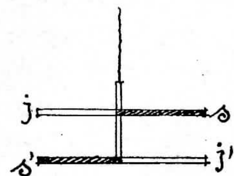
Zad. **107.** Horizontalna komponenta jakosti zemaljskoga polja neka je 0·188 ersteda, inklinacija $66^1/_2{}^0$; kolika je jakost polja? [0·469 ersteda]

Zad. **108.** Magnet, koji se njiše oko vertikalne osi, načini u Sijamu 2 puta toliko njihajeva, koliko bi načinio u jednako vrijeme na južnome rtu Nove Zemlje; koliko je puta horizontalna komponenta zemaljskoga magnetskoga polja na prvom mjestu veća?

Zad. **109.** Kako teku izogone u okolišu geografskih polova?

Zad. **110.** Zašto neki htjedoše, da bi se ona strana magneta, što je zovemo sjevernom, zvala južna?

140. Astatičke igle. Gdjekada je stalo do toga, da se utjecaj magnetskog polja zemaljskog oslabi ili ukloni. Pokraj kratke deklinatorne igle, kojoj je sjeverni pol A (sl. 151.), položimo horizontalni magnetski štap tako, da je u magnetskom meridijanu, a sjeverni mu je pol okrenut prema sjeveru. Ako su polovi štapa s i j jednako udaljeni od točke A, dat će sile P i Q, kojima oni djeluju na tu točku, rezultantu, koja leži u magnetskom meridijanu, a upeřena je prema jugu. Ta rezultanta slabi horizontalnu konponentu zemaljskoga polja, a može je baš i uništiti. U potonjem slučaju kažemo, da je igla astazirana (Biot i Savart 1820.). Astaziranje se primjenjuje kod galvanometara. Astaziranom iglom lako opažamo utjecaj (promjenljivoga) magnetskoga polja, što ga izvodi struja nedalekoga električnoga tramvaja.



Sl. 152.

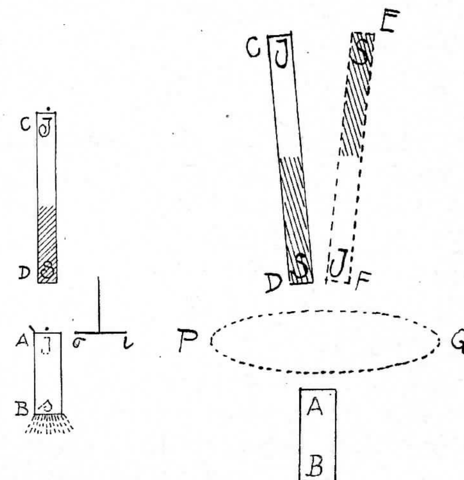
Dvije igle sj i $s'j'$ jednake i jednako magnetizirane sastavimo štapićem u čvrsto tijelo, tako da su usporedne, a polovi njihovi obrnuto namješteni; sile, kojima homogeno magnetsko polje djeluje na dobiveno tijelo, uništuju jedna drugu (sl. 152.). Astatički par magneta (Ampère 1821.; *astatičan, bez* [grč. niječna čestica α] određene *ravnoteže*).

Zad. **111.** Neka se pobliže objasni sastavljanje sila, kojima jednomjerno polje djeluje na astatički par magneta.

141. Magnetska influencija. Ako mekom željezu AB (sl. 153.) približimo magnet CD, željezo postaje i samo magnetično, te privlači željeznu pilotinu. Kad magnet uklonimo, pilotina spadne; magnetizam se željeza opet izgubio. Taj se pojav zove magnetska influencija (lat. *influo, utječem*). Polovi influenciranog magneta tako se namjeste, da su susjedni polovi željeza i magneta raznoimeni. O tom se možemo uvjeriti, ako željezu približimo sitnu horizontalnu na niti obješenu magnetsku iglu s polovima σ i ι. — Magnet dakle privlači željezo, jer je željezo influencijom i samo postalo magnetično. — Magnetski lanac.

Ako tik magneta CD stavimo jednak magnet EF (sl. 154.), tako da im raznoimeni polovi budu jedan blizu drugomu, pa ako su magneti otprilike jednako jaki, ne ćemo opaziti influencije. Na mjestu željeza A, na kojem bi jedan magnet sam za se influencirao južni magnetizam, drugi bi stvorio sjeverni magnetizam, pa se učinci ukidaju. Polja se obaju magneta uništavaju, pa zato nema ni influencije.

Ako između magneta CD i mekoga željeza AB (sl. 154.) stavimo ploču od željeznoga lima PQ, željezo otpušta pilotinu dakle gubi influencirani magnetizam. Influencija nastaje sada u limu, a djelovanje magneta CD na željezo AB slabi se djelovanjem magnetizma, što je u limu influenciran. Kažemo, da ploča štiti željezni štap od magneta.



Sl. 153. Sl. 154.

I čelik postaje influencijom magnetičan; pri tome je znatno, da čelik velik dio influenciranoga magnetizma pridrži i onda, kad se ukloni magnet, koji je pobudio influenciju. Zato i jesu „umjetni“ magneti od čelika. Oni se magnetiziraju influencijom, pa se zato dovedu u jako magnetsko polje, na pr. u unutarnjost uzvojnice od žice, kojom teče električna struja. Gdje nema dosta jakog i prostranog magnetskog polja, zgodan je način magnetiziranja taj, da se čelik po jednostavnom propisu tare magnetom. — Ako sjevernom kraju jakoga magneta približujemo sjeverni kraj magnetske igle, opazit

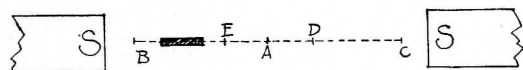
ćemo, kako najposlije magnet iglu privuče. Pri tom se dakako ne privlače istoimeni magnetizmi, već se sjeverni kraj igle influencijom pretvorio u južni.

Magnetizam, što preostane, kad uklonimo sve susjedne magnete, zove se remanentni magnetizam (lat. *maneo, ostajem*).

Da se potpuno uništi magnetizam, treba kod raznih vrsti željeza i čelika različito jako magnetsko polje; kažemo, da je u njih različita „koercitivna sila", t. j. svojstvo, da priječe uništavanje svoga magnetizma (lat. *coerceo, zaustavljam*).

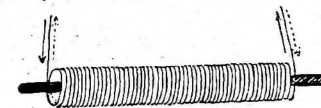
U oduljem željeznom štapu postavljenu otprilike u smjer magnetskoga polja zemaljskoga Zemlja izvodi influenciju, tako da u našim krajevima donja strana štapa bude sjeverno magnetična, gornja južno magnetična. Kad tako magnetiziran štap obrnemo, izmjene se polovi, te je opet sjeverni pol na donjoj strani. Štapove od gdjekojih vrsti željeza treba udariti kladivom, dakle potresti, ako hoćemo, da ih Zemlja influencira (Gilbert 1600). Influencija pod utjecajem zemaljskoga polja znatno se opaža kod željeznih brodova; oni već u gradilištu postaju magneti, pa njihov magnetizam djeluje na kompas, a to otešćava primjenu kompasa.

142. Histereza. Dva jednaka magnetska štapa namjestimo jedan u produženje drugoga tako, da su im susjedni polovi istoimeni na pr. sjeverni (sl. 155.). U prostoru među magnetima na spojnici polova magnetsko se polje tako mijenja, da je blizu polova najjače, a u sredini A, gdje polje mijenja smjer, jakost je polja = 0. Stavimo li u spojnicu polova štapić od čelika, pa ga prenosimo u toj spojnici amo tamo putom $BCBCB$... štapić će u sredini A imati ostatak magnetizma, što ga je influencijom dobio kod pola, od kojega je baš stigao: kad je donesen iz B u A, bit će sjeverni pol nadesno, a kad je došao iz C u A, bit će sjeverni pol nalijevo. Da se sasvim uništi manetizam, što ga je štapić primio u točki B, treba štapić prenijeti preko točke A, na pr. do točke D, gdje je polje protivnoga smjera dosta jako, da svlada remanentni magnetizam. Na sličan se način tek negdje u točki E uništio remanentni magnetizam dobiven u točki C. Štapić prima dakle magnetizam 0 vazda kasnije nego što je prošao kroz polje 0. Magnetizam za poljem zaostaje, pa se taj pojav zove histereza (grč. ὑστερέω, *zaostajem*).



Sl. 155.

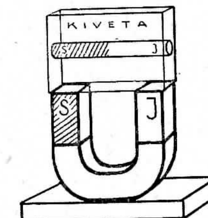
Na putu BD polje priječi štapić u gibanju, na putu DC ga podupire. Na putu BD treba dakle vršiti radnju, dok se na putu DC radnja dobiva. Kako je prva radnja veća od druge, izlazi, da prenoseći štapić od B do C trošimo određenu množinu mehaničke energije. Iskustvo pokazuje, da se namjesto nje stvori toplina i štapić ugrije (Warburg 1881.). Isto tako nastaje toplina, ako iglu pletenku stavimo u uzvojnicu, kojom teče izmjenična električna struja (sl. 156.); električna struja stvara magnetsko polje i kako se smjer i jakost struje mijenjaju, mijenja se to polje i igla toliko puta u sekundi mijenja svoje polove, koliko puta struja promijeni smjer. Ako je struja dosta jaka, igla se za kratko vrijeme toliko ugrije, da se to može i rukom osjetiti.


Sl. 156.

Ako se umjesto čeličnog štapića uzme štapić od mekoga željeza, točke se E i D gotovo podudaraju sa A. Onda je potrošak mehaničke radnje neznatan dakle i toplina dobivena mijenjanjem magnetizma malena. Kod mnogih električnih strojeva ima željeza, a u njem se izmjeničnom strujom mijenja magnetizam; od velike je gospodarstvene važnosti, da se pri tom upotrebljava takva vrst željeza, u koje je histereza neznatna, a po tom i traćenje energije maleno.

Magnetu možemo oduzeti magnetizam, ako ga stavimo u uzvojnicu, kojom teče dosta jaka izmjenična električna struja i onda magnet sporo iz uzvojnice izvučemo. Magnet u uzvojnici djelovanjem magnetskoga polja struje periodski mijenja smjer svoga magnetizma. Kad magnet izvlačimo, dolazi na mjesta, gdje je magnetsko polje slabije, pa mu se i magnetičnost mijenja među sve manjim skrajnjim vrijednostima.

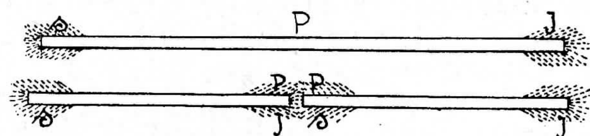
Lebdeći magnet. Potkovastom magnetu, kojemu su polovi okrenuti prema gore, približimo odozgo horizontalan magnetski štap, tako da sjeverni pol štapa dođe iznad sjevernog kraja potkove, južni pol iznad južnog kraja. (Sl. 157.) Štap leži u dnu staklene kivete, u kojoj se može gibati samo gore, dolje. Radi odbojnosti istoimenih polova štap će u kiveti lebdjeti. Nije dugo tomu, što se taj jednostavni pokus prvi puta mogao izvesti. Starije vrsti čelika sve su imale premalenu koercitivnu silu, tako da su se polovi štapa promijenili, kada se štap — poradi težine — približio potkovi: odbojnost se pretvorila u privlačnost. Novi čelik, s kojim lebdenje uspije, jest kobaltov čelik.



Sl. 157.

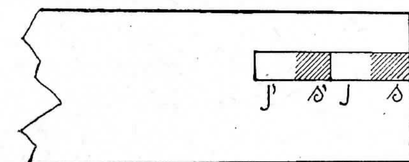
143. Teorija magnetizma. Ako magnetiziranu iglu pletenku prelomimo u dva dijela, svaki će dio biti potpun magnet. Na mjestu preloma P (sl. 158.) prvobitni magnet nije pokazivao magnetizma ili je privlačio

samo malo željezne pilotine; oba lomljenjem dobivena magneta na tom istom mjestu *P*, t. j. na svojim novim krajevima, pokazuju jak magnetizam. Onaj kraj, koji je i u prvobitnog magneta bio kraj, pridrži vrst svoga magnetizma, dok novi kraj dobije magnetizam protivne vrsti. Ako lomljenje nastavimo, dokle možemo, dobivamo sve sitnije magnetiće. (Petrus Peregrinus, u 13. vijeku.)



Sl. 158.

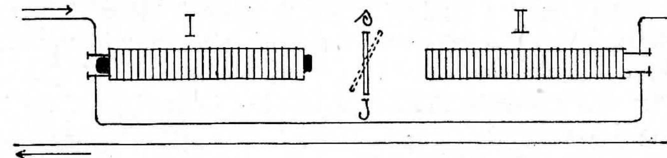
Taj pojav objašnjava teorija, koja kaže, da su željezo i druga tjelesa, koja mogu postati magnetična, sastavljena od mnogo sitnih, jednako jakih magnetića (Kirwan 1797.). Kad su ti „elementarni magneti" bez reda porazbacani, nema sklada u njihovu djelovanju, te u okolišu tijela nigdje nije polje njihovo dosta jako, da bismo ga mogli opaziti. Dovedemo li željezni štap u jako magnetsko polje, elementarni će se magneti namjestiti u smjer polja, te će svi sjeverni krajevi biti okrenuti u taj smjer. U sl. 159. krupnim su načinom predočena dva elementarna magneta *s j* i *s' j'* pravokutnicima. Budući da je djelovanje magneta u ovećem razmaku zavisno samo o magnetskom momentu (§ 138.), zamislit ćemo elementarne magnete s takovom dužinom, da se raznoimeni polovi *j* i *s'* elementarnih magneta, što slijede jedan za drugim, podudaraju, pa im se djelovanje uništava. Preostaje samo djelovanje onih polova elementarnih magneta, koji su na krajevima štapa, te nam se pričinja, da ima magnetizma samo na jednom i drugom kraju. Prema tome pojav influencije nije drugo nego pravilno namještanje elementarnih magneta. Magnetizam, što ga neposredno opažamo, zove se slobodni magnetizam. Lomljenjem magnetske igle javljaju se novi magnetski polovi, jer se na novim krajevima „oslobodio" sloj magnetizma, koji je prije bio „vezan".



Sl. 159.

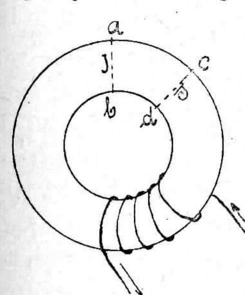
Slobodni magnetizam krajeva nastoji, da elementarne magnete zakrene za polovicu okreta. Zato pomišljamo, da se elementarni magneti popuštajući djelovanju krajeva namjeste — osobito u blizini krajeva — koso prema dužini magneta. Tek ako je polje, što izvodi influenciju, vrlo jako, prevlada njegova jakost toliko nad djelovanjem krajeva, da su elementarni magneti gotovo točno usporedni. Onda se magnet ne da još jače magnetizirati, on je „zasićen" magnetizmom. Zasićenost može se ovako pokazati. Deklinatorna igla *sj* miruje u magnetskom meridijanu; simetrično prema njoj

postavljene su, kako sl. 160. pokazuje, dvije uzvojnice od žice I, II; kroz uzvojnice redom vodimo istu električnu struju i to tako, da se magnetska polja uzvojnica na mjestu igle uništavaju. Kolikogod pojačali struju, na iglu ona ne djeluje. No ako se u jednu uzvojnicu stavi željezni štap, postaje štap influencijom od polja struje magnetičan i zakrene iglu iz magnetskoga meridijana za kut, koji je to veći, što je magnetizam štapa jači. Pokus pokazuje, da se taj kut jačanjem struje približuje nekoj krajnjoj vrijednosti, koje ne može nadmašiti, makar koliko struju pojačamo.



Sl. 160.

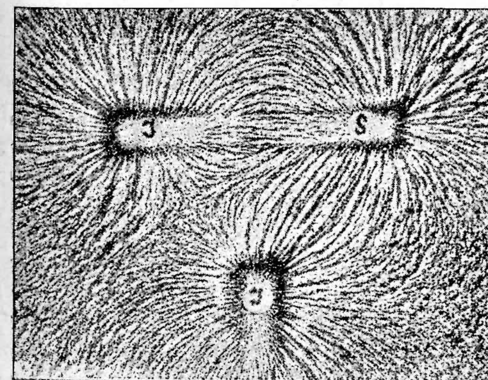
Udarcima se pogoduje influencija (§ 141.), jer se uzdrmaju elementarni magneti, pa im se time olakšava, da poprime položaj, koji im polje propisuje. Iz sličnoga razloga udarci oslabljuju trajne magnete.



Sl. 161.

Ima magneta, koji ni na kojem mjestu ne privlače željezne pilotine. Ako iz čeličnog lima izbijemo prsten, pa ga potpuno omotamo žicom (u sl. 161. nacrtano je samo nekoliko uzvoja žice) i kroz žicu pustimo struju, prsten postane magnetičan. Prsten toga magnetizma ne odaje, o čemu se možemo uvjeriti, ako žicu opet uklonimo i prsten stavimo u pilotinu. Da je on ipak magnetičan, razabire se, ako se iz prstena izreže isječak *abcd*; odmah se onda pojavi slobodni magnetizam na krajevima *ab* i *cd*. — U elektromagnetu magnetsko polje električne struje magnetizira meko željezo. Ako elektromagnetu dodamo željeznu kotvu, tako da sve željezo zajedno ima oblik zatvorenoga kruga ili okvira, te nema slobodnoga magnetizma, magnetizam se željeza sačuva i onda, kad struju prekinemo; kotva se ni iza mnogo vremena ne da lako otkinuti. Ako je ipak otrgnemo, magnetizam, što se oslobodi na krajevima, uništi poredaj elementarnih magneta i željezo ne pokazuje više magnetizma.

144. Magnetske silnice. Ako na jedan ili više magneta postavimo horizontalnu ploču od ljepenke ili stakla, pa je pospemo željeznom pilotinom i potresemo lako kucajući prstom, pilotina se poreda u lijepe krivulje. (Descartes 17. vijek.) Te krivulje spajaju mjesta, ispod kojih su raznoimeni polovi (u sl. 162. je desni pol sjeverni, a lijevi i prednji su južni). Zrnca pilotine u polju postanu influencijom magnetična, pa se ona susjedna zrnca, što slijede jedno za drugim u smjeru polja, privuku i načine „lanac", koji se namjesti koliko može u smjer polja.

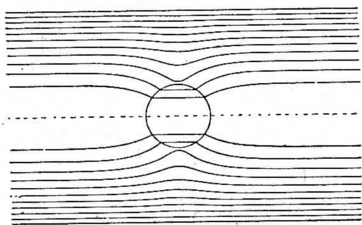


Sl. 162.

Krivulja, koje tangenta svagdje ima smjer magnetskoga polja, zove se magnetska silnica. Gdje je polje horizontalno, mogu se silnice vjerno prikazati željeznom pilovinom. Inače nas krivulje pilotine samo donekle uče, kako idu silnice.

Sustav silnica može se tako izvesti, da nam osim smjera magnetskoga polja pokaže još i jakost njegovu. Razložit ćemo to na najjednostavnijemu primjeru. Magnetski pol $+ \mu$ opkolimo kuglom, kojoj je središte u polu a polumjer na pr. 10 cm. Na površini te kugle jakost je magnetskoga polja $\mu/100$ ersteda (zašto?); a na površini koncentrične kugle dvostrukoga polumjera jakost je polja $1/4$ prednašnje vrijednosti. Silnice su ovdje pravci, koji izilaze iz središta. Ima ih nebrojeno mnogo, ali ćemo odabrati samo određen broj silnica i to tako, da su one što jednoličnije u prostoru porazmještene. Kroz svaki kvadratni cm manje kugle prodire onda jednako mnogo silnica, a isto su tako na svima mjestima površine veće kugle silnice jednako guste. Budući da se silnice izašavši iz pola razilaze, gustoća je njihova na površini veće kugle manja negoli na površini manje. Kako je površina veće kugle 4 puta veća od površine manje, ići će kroz 1 cm^2 veće kugle samo $1/4$ broja silnica. Gustoća silnica opada dakle po onom istom zakonu, po kojemu i jakost polja. Zato gustoća silnica može služiti kao mjera jakosti polja. — Može se pokazati, da se i u svim drugim primjerima mogu silnice tako konstruirati, da broj silnica, što prolaze kroz 1 cm^2 namješten okomito na smjer polja, bude razmjeran s jakošću polja. — Svojstva silnica i važnost njihovu upoznao je Faraday (1852.).

Ako u magnetsko polje stavimo komad željeza, postaje ono influencijom magnetično; idući smjerom magnetskoga polja naći ćemo, da je ono ispred i iza željeza influenciranim magnetizmom pojačano, dok je pokraj željeza oslabljeno (zašto?). Tome odgovara i oblik silnica: one kroz željezo prolaze s povećanom gustoćom. Kažemo, da željezo ima veliku permeabilnost (lat. *meo, idem*), t. j. da laglje negoli druge tvari propušta silnice. U sl. 163. prikazano je, kako se izobliči polje, kad se u nj dovede željezna kugla.



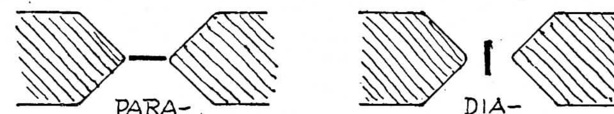
Sl. 136.

Magnetsko se polje može isporediti sa strujanjem vode. Ako rijeka teče koritom, koje je zaraslo biljem, a samo mu je jedan dio iskrčen, tok se vode poglavito navrne u iskrčeni prostor; tuda su „crte strujanja" gušće i brzina vode veća.

Zad. **112.** Koliko silnica treba da izlazi iz pola μ, da jakost polja bude dana brojem silnica, što idu kroz 1 cm^2 okomit na smjeru polja? [$4\pi\mu$]

145. Feromagnetizam, paramagnetizam i diamagnetizam. Osim željeza, čelika i magnetovca mogu se i neke druge tvari ojače magnetizirati. Tvari poput željeza, kojih permeabilnost nije baš neznatna, zovu se feromagnetične (lat. *ferrum, željezo*). To su poimence nikalj i kobalt, magnetovac i neke slitine. Kod visokih temperatura feromagnetizam nestaje: magnet ne privlači željezo, koje je dovoljno užareno.

Faraday je pokazao (1846.), da se sve tvari dadu makar vrlo slabo magnetizirati. Da se to utvrdi, treba što jači magnet, naime elektromagnet. Objesi li se štapić od paladija, platine, kositera i t. d. na nit od čahure, da visi horizontalno posred prostora među polovima (stošcima) elekromagneta, štapić se namješta u smjer polja (sl. 164. lijevo). Tvari, što se tako vladaju, zovu se paramagnetične (prema grč. vezniku *παρά*). Štapić od



Sl. 164.

bizmuta, zlata, bakra, olova, kvarca, slankamena i t. d. namješta se okomito na smjer polja (sl. 164. desno). Te se tvari zovu diamagnetične (prema grč. vezniku *διά*). Za jednu i drugu vrst tjelesa treba uzeti, da su influencijom postala magnetična; paramagnetičan štapić poput feromagnetičnoga u blizini sjevernoga pola postaje južno magnetičan, diamagnetičan naprotiv tome (ako ga stavimo u smjer polja) ima južnu svoju stranu u blizini južnoga pola elektromagneta. Između feromagnetičnih tvari i paramagnetičnih velik je jaz; prve se mogu miljune puta jače magnetizirati negoli potonje.

Da se ispita magnetizam tekućine, stavi se ona u cjevčicu tankih stijena, pa se poput štapića objesi u magnetsko polje. Pri tome valja pripaziti i na magnetizam cjevčice same. — Jedan krak U-cijevi, u kojoj ima tekućine, stavimo u elektromagnet, tako da je meniskus tekućine baš među polovima, dok elektromagnet nije pobuđen; pobudi li se magnet, meniskus se uspne, ako je tekućina paramagnetična, a spusti, ako je diamagnetična. — Plamen svijeće u zgodnoj visini među polovima snizit će se, kad magnet pobudimo, i rastaviti poprijeko spram magnetskoga polja u dva jezička, te će poprimiti oblik ribljega repa. — Osobito je jako paramagnetičan tekući i čvrsti kisik, voda je slabo diamagnetična. — Ako štapić paramagnetičan visi u tekućini, koja je jače paramagnetična, vlada se kao da je diamagnetičan. Taj se tobožnji diamagnetizam tumači od prilike kao i plivanje tjelesa u tekućini veće specifične težine.

2. Elektrostatika

146. Dvije vrsti elektriciteta. Od davnine se znade, da jantar natrt suknom privlači laka tjelešca. Gilbert je i u drugih tvari našao taj pojav (1600.). Da ga izvedemo, danas najčešće upotrebljavamo štap od flintova stakla (olovno staklo velike težine; engl. *flint, kremen*), koji taremo kožom namazanom zgodnim amalganom, ili štap od ebonita (kaučuk sa sumporom; naliči ebanovini), koji taremo krznom. Kad tijelo iza trenja privlači tjelesa, kažemo da je električno, da smo ga elektrizirali, da ima

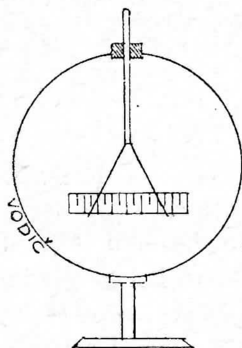
elektricitet ili električni naboj (grč. ἤλεκτρον, *jantar*). Da vidimo, je li tijelo električno, približimo mu kuglicu od bazgine srčike obješenu na tankoj kovnoj niti: električno tijelo privlači kuglicu.

Električno tijelo može i odbijati druga tjelesa (Guericke 1663.). Ako laka kuglica visi na svilenoj niti, pa je elektrizirani štap privuče, te se kuglica dotakne štapa, ona će se opet od štapa otisnuti i štap će je odbijati. Pomišljamo, da je na kuglicu doticajem prešlo nešto elektriciteta sa štapa i da se taj elektricitet i onaj, što je na štapu preostao, odbijaju. Ako kuglici nabitoj elektricitetom sa staklenog štapa približimo drugo električno tijelo, ono ne mora kuglicu odbijati već je može i privlačiti. U prvom slučaju kažemo, da tijelo ima elektricitet stakla, u drugom, da ima elektricitet smole (Dufay 1730.); raznoimeni se elektriciteti privlače, istoimeni odbijaju. Ebonit iza trenja privlači kuglicu, koja ima elektricitet stakla, dakle je ebonit trenjem dobio elektricitet smole.

„Elektricitet smole“ se najprije opazio kod nekih trenjem elektriziranih smolastih tvari.

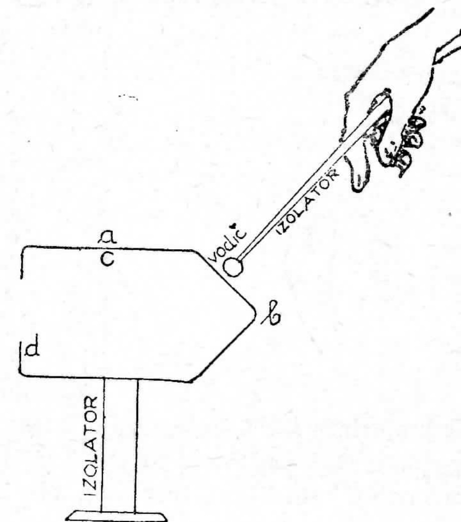
Nauk o ravnoteži električnih naboja zove se elektrostatika.

147. Vodiči i izolatori. Kuglu od mjedi ili druge kovine stavimo na nogu od ebonita; elektrizirani stakleni štap potegnimo tako, da točke njegove redom prođu blizu kugle. Čujemo značajno pucketanje, jer naboj štapa na kuglu preskakuje, te kugla i sama postane električna. Ako sad kuglu dotaknemo prstom, izgubit će naboj; pomišljamo, da je naboj kroz tijelo odveden u zemlju. Isto će se dogoditi, ako nabitu kuglu dotaknemo komadom kovine, koji držimo u ruci, vlažnim koncem, ugljenom, mlazom vode i t. d. Sva ta tjelesa zovemo dobrim vodičima elektriciteta ili ukratko vodičima. I plamen i plinovi, što iz njega izlaze, dobri su vodiči. Ako nabitu kuglu dotaknemo parafinom, ebonitom, suhim staklom, jantarom, sumporom, svilom i t. d., ne ćemo opaziti, da bi se naboj smanjio. Ta se tjelesa zovu loši vodiči elektriciteta. Električki se naboj na vodiču sačuva, ako se vodič tiče samo loših vodiča. Zbog te svoje primjene loši se vodiči zovu također izolatori (franc. *isoler, osamiti;* prema sr.-lat. *insulare*). Nema savršenih izolatora, već svako tijelo makar neznatno odvodi elektricitet. Od najgorjih vodiča do najboljih prelaz je postepen. — Zbog nevidljiva sloja vlage na površini često se izolatori pričinjaju vodičima. Ebonit izložen svjetlosti sve gore izolira, jer se na površini stvaraju higroskopični sulfati; ležanjem u vodi sulfati se otope, pa će ebonit osušen opet izolirati. — Razliku između dobrih i loših vodiča upoznao je Gray (1729.).


Sl. 165.

148. Elektroskop. Da se ispita, je li tijelo električno, služi nam elektroskop. Najpoznatiji je elektroskop sa zlatnim listićima (sl. 165.). Elektroskop ima „kućicu“, kojoj su stijene od veće česti od kovine, a samo toliko od stakla, da se vidi u unutrašnjost; otvor na gornjoj strani kućice zatvoren je što boljim izolatorom; kroz taj izolator utisnut je u kućicu štap od kovine, koji na svom donjem kraju nosi dva zlatna listića. Ako štap, a s time i listiće nabijemo, listići se radi odbijanja istoimenih naboja razmaknu, te „divergiraju“ (lat. *vergo, uperen sam*). Listići su laki, te se već kraj slabog naboja jako razmiču; kućica štiti listiće od struja uzduha. Ona je redovno vodičem spojena sa zemljom. Za listićima često stoji ljestvica razdijeljena na milimetre, stupnjeve ili drukčije. Razmak se listića može i tako mjeriti, da ih motrimo mikroskopom, koji ima u svom „okularu“ na staklu urezanu ljestvicu.

149. Pozitivni i negativni elektricitet. Dva sasvim jednako građena elektroskopa neka su nabita do jednakog razmaka listića raznoimenima elektricitetima. Kažemo onda, da elektroskopi imadu raznoimene jednake naboje. Ako štapove obaju elektroskopa sastavimo izoliranom žicom, listići će spasti: jednake se množine raznoimenih elektriciteta združivanjem uništavaju. U tom je sličnost s algebrom, gdje brojevi protivnih predznakova, a jednakih apsolutnih vrijednosti zbrajanjem daju 0 (na pr. $(+5) + (-5) = 0$). Zbog te sličnosti označujemo elektricitet stakla pozitivnim, elektricitet smole negativnim (Franklin 1750.); mogao se i obrnuto elektricitet stakla prozvati negativnim, a elektricitet smole pozitivnim.



Sl. 166.

150. Razmještaj elektriciteta na vodiču. Ako izoliran vodič nepravilna oblika (sl. 166.) nabijemo elektricitetom, „gustoća“ je naboja na različitim mjestima različita. To se pokazuje „pokusnom kuglicom“ (Coulomb), kuglicom od vodiča, koja je učvršćena na dršku od izolatora. Nabito se tijelo dotakne na kojemugod mjestu pokusnom kuglicom, a onda se kuglica prenese k elektroskopu i dotakne štapa njegova. Listići se elektroskopa razmaknu jače ili slabije — prema tome, koje smo mjesto tijela kuglicom dotakli bili. Kad se pokusna kuglica tiče vodiča, ona je i sama kanda dio njegov, a kako je neznatna, zacijelo ne utječe mnogo na razmještaj elektriciteta. Ako je ona na mjestu vodiča, gdje je mnogo elektriciteta, poprimit će i sama znatan naboj, te će

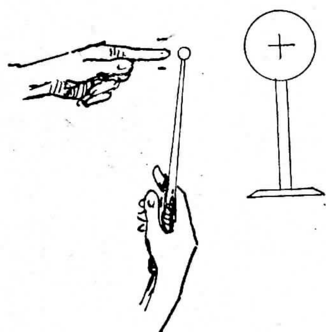
se od toga naboja listići elektroskopa jako razmaći. Tako se pokazuje, da je električna gustoća na oblim mjestima površine na pr. *a* manja, nego li na šiljku *b*. Uvodeći pokusnu kuglicu u šupljinu vodiča uvjerit ćemo se, da unutarnja površina (na pr. točka *c*) nema naboja. To vrijedi, makar koliko tanka bila stijena, koja luči unutarnju površinu od izvanje. — Treba dodati, da i unutarnja površina pokazuje naboj u blizini otvora (na pr. točka *d*). Uvjereni smo, da baš nikakvoga naboja nema na unutarnjoj površini šupljega vodiča, ako je šupljina sasvim zatvorena. Sijelo je elektriciteta kod vodiča izvanja njegova površina.

Ako je neki izolirani vodič tako malen, da se može uvesti u šupljinu drugoga izoliranoga vodiča, može se naboj manjega vodiča sasvim predati većemu i to tako, da veći vodič iznutra dotaknemo manjim, a onda manji vodič uklonimo. — Ako izoliranu kovnu kuglu dotaknemo izoliranom jednakom kuglom, naboj se razdijeli, pa kažemo, da kugla iza doticaja ima polovicu prvotnoga naboja. Pri tome pomišljamo, da se množina elektriciteta prelaženjem ne mijenja.

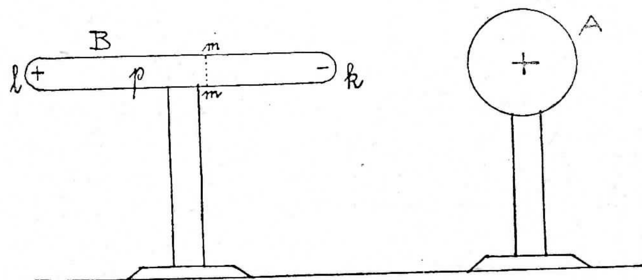
Zad. **113.** Kako se može naboj kovne kugle smanjiti na $^1/_4$? kako na $^1/_8$?

Zad. **114.** Naboj kugle treba uz pomoć dviju s njom jednakih kugala smanjiti na $^3/_8$.

151. Električna influencija. Ako vodiču približimo elektrizirano tijelo, postaje i sam električan (Gray). S prsta, koji je blizu nabijene kugle, možemo pokusnom kuglicom prenositi naboje (sl. 167.) na elektroskop. Kad se elektricitet pobuđuje u vodiču približavanjem elektriziranoga tijela, zovemo to električnom influencijom. Ta influencija donekle nalikuje magnetskoj. Da je bolje ispitamo, približimo električnom tijelu *A* izoliran vodič *B* (sl. 168.) duguljasta oblika, koji je svojim najduljim promjerom uperen prema tijelu *A*. Pokusnom kuglicom i elektroskopom nalazimo, da je „influencirani" naboj najjači na krajevima *k* i *l*, dok negdje blizu sredine tijela ima pojas *mm*, gdje ne opažamo elektriciteta. Ako vodič udaljimo od tijela *A*, nestat će influencirani naboj. Razlog je tome taj, što ima jednako mnogo influenciranog pozitivnog i negativnog naboja; na kraju *k*, koji je bliži tijelu *A*, namjesti se naboj, koji je protivne vrsti, nego li naboj tijela *A*, na odmaknutom kraju *l* nalazi se naboj iste vrsti (Aepinus 1759.).



Sl. 167.

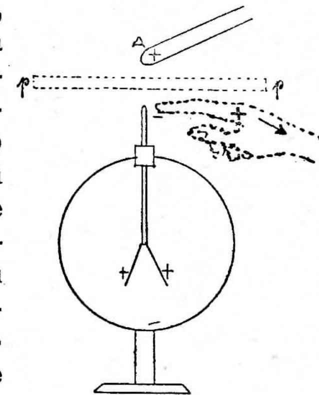


Sl. 168.

Ako influencijom elektriziran vodič *B* žicom sastavimo sa zemljom, umaći će elektricitet, koji je iste vrsti, kao i elektricitet tijela *A*, kroz žicu u zemlju. Pri tom je svejedno, na kojem mjestu žicu nadovežemo na tijelo *B*. Influencirani elektricitet, koji je protivan elektricitetu tijela *A*, ostaje, jer ga elektricitet tijela *A* privlači.

Ispitujući gustoću elektriciteta na vodiču (pređašnji §) šuteći smo uzeli, da u šupljini vodiča nema izoliranog naboja. Ako se u izoliranoj limenoj kutiji nalazi električno tijelo, nastaje na unutarnjoj strani kutije influencijom elektricitet protivne vrsti, na izvanjoj elektricitet iste vrsti. Ako kutija nije izolirana, potonji naboj ide u zemlju. Kutija onda ne pokazuje ni na osjetljivu elektroskopu naboja, premda se u njoj nalazi izolirani naboj i influencirani. Razlog je tome taj, što su množine tih naboja jednake. Ako je izoliran naboj sasvim zatvoren u šupljini vodiča, influencira se na unutarnjoj površini šupljine jednaka množina elektriciteta protivne vrsti (dakle na izvanjoj jednaka množina elektriciteta istoimenog). (Faraday 1843.)

152. Primjena influencije. Često se elektroskop nabija uz pomoć influencije. Približimo štapu elektroskopa na pr. pozitivno električno tijelo *A* (sl. 169.), dotaknimo štap prstom, uklonimo prst, a onda uklonimo tijelo *A*; elektroskop je sada negativno nabit. — Na osnovu influencije upoznajemo, kakav je naboj elektroskopa. Ako razmak listića naraste, kad se elektroskopu odozgo približi pozitivno električno tijelo, naboj je listića bio pozitivan; razmak je listića narasao, jer se prvobitnom pozitivnom naboju pridružio influencirani pozitivni naboj. Ako se razmak listića u tom pokusu smanjio, naboj je listića bio negativan. — Ako se između elektroskopa i elektriziranoga tijela stavi ploča od vodiča *pp*, ona će „štititi" elektroskop od influencije (isp. magnetsko štićenje); to je štićenje bolje, ako je ploča vodičem spojena sa zemljom, negoli ako je izolirana (zašto?).



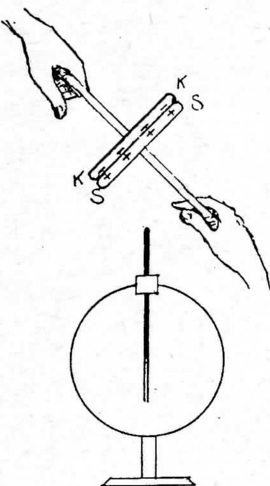
Sl 169.

Ako staklenu ploču *SS* učvršćenu na dršku taremo kožom razapetom na drugoj ploči *KK*, pa ako obje ploče u doticaju donesemo u blizinu elektroskopa (sl. 170.), ne ćemo opaziti influencije. Na staklu nastalo je trenjem toliko pozitivnog elektriciteta, koliko je negativnog elektriciteta nastalo na koži; dok su ti naboji jedan drugome blizu, učinci se njihovi na okoliš uništavaju. (Koji je pojav sličan tome kod magnetizma?) Dovede li se samo ploča *SS* ili samo ploča *KK* k elektroskopu, listići se razmiču. Trenjem nastaju jednake množine pozitivnoga i negativnoga elektriciteta.

Zad. 115. Zašto elektrizirano tijelo jače privlači kuglicu obješenu na kovnoj niti, negoli istu kuglicu na svilenoj niti?

Zad. 116. Elektroskopu približimo elektrizirano tijelo; kolik je razmak listića, dok elektroskop tičemo prstom?

153. Nazori o elektricitetu. Pomišljamo, da u vodiču, koji nije nabit, ima na pretek pozitivnog i negativnog elektriciteta smiješanih u jednakim množinama, te ih ne opažamo. To vrijedi i za pojedini atom, jer sastoji od pozitivnog elektriciteta, koji tvori (razmjerno tešku) „jezgru" atomovu, i od jednake množine negativnog elektriciteta (mnogo lagljih) „elektrona", koji se nalaze u okolišu jezgre. Ako se koji elektron oduzme atomu, atom postaje kao cjelina pozitivan. Kako u bakru i drugim krutim kovinama atom ne putuje sa svoga mjesta, pozitivni je elektricitet u tim tvarima nepomičan. U njima mogu se gibati samo elektroni, t. j. negativni elektricitet. Takav vodič ima pozitivan naboj, ako neki atomi njegove površine nemaju potpun broj elektrona; a naboj je negativan, ako je u površini odviše elektrona. Prema starom običaju ipak i danas još govorimo i za pozitivni elektricitet, da ga na pr. elektroskopu „dovodimo", premda pri tom u istinu odvodimo s elektroskopa elektrone.



Sl. 170.

Naše znanje o elektricitetu uopće je u skladu s dualističkom hipotezom 18. vijeka, prema kojoj postoje dvije vrsti elektriciteta. Unitarna hipoteza (Franklin, 1750.) naučala je, da ima samo jedan elektricitet, koji može prelaziti s tijela na tijelo. Tomu shvaćanju današnje donekle naliči samo kod krutih kovina.

Elektricitet elektrona jest najmanja množina elektriciteta, što je poznajemo. Zove se elementarni naboj.

154. Coulombov zakon. Za odbijanje i privlačenje električnih naboja vrijedi po Coulombu (1785.) zakon sličan zakonu magnetskih sila (isp. § 135.). Ako je e množina elektriciteta u točki P, e_1 množina elektriciteta u točki Q, a razmak tih točaka $PQ = r$, odbojna je ili privlačna sila

$$p = K\frac{ee_1}{r^2}.$$

I ovdje se kao kod primjene zakona magnetskih sila odbojna sila uzimlje pozitivno, privlačna negativno.

Valja pripomenuti, da se sila p mijenja, ako promijenimo izolator, koji okružuje naboje. Prema tome je vrijednost konstante K za svaki izolator druga. Na to se nauka tek iza Coulomba osvrnula, pa ćemo i mi zasad pomišljati, da su električni naboji „uronjeni" u uzduh.

155. Jedinica množine elektriciteta. Jedinicom množine elektriciteta zove se ona množina, koja na jednaku množinu u razmaku 1 cm djeluje silom 1 din. Tako određena jedinica osnov je elektrostatskoga c-g-s—sustava električkih i magnetskih jedinica. Uz taj izbor jedinice konstanta je $K = 1$, a Coulombov zakon glasi

$$p = \frac{ee_1}{r^2}.$$

Uz jedinicu elektriciteta sada spomenutu upotrebljava se još

1 el.-magn. c-g-s—jedinica = $3 \cdot 10^{10}$ el.-stat. c-g-s—jedinica,

a i jedinica el.-magn. praktičnog sustava prozvana kulon:

1 kulon = 0·1 el.-magn. c-g-s—jedinica = $3 \cdot 10^9$ el.-stat. c-g-s—jed.

Ne će se ovdje razložiti, koji putovi vode na potonje dvije jedinice. Čini se, da bi bilo jednostavnije, kad bi se upotrebljavao samo jedan sustav jedinica, no električki su pojavi raznovrsni, pa se razabralo, da je jedan sustav jedinica prikladniji u jednom području nauke, drugi u drugom. Elektrostatski se sustav upotrebljava gotovo samo u elektrostatici, dok se elektromagnetski sustavi primjenjuju u čitavom području nauke o elektricitetu.

Elementarni električni naboj — pozitivni ili negativni — sadržaje $4{\cdot}80 \times 10^{-10}$ el.-st. c-g-s—jedinica. Prvi ga je točnije odredio Millikan 1910.

Zad. 117. Dvije jednake kovne kuglice, svaka teška 0·4 g*, obješene su u istoj točki jedna uz drugu na lakim svilenim nitima, dugima 40 cm. Ako ih nabijemo elektricitetom, razmaknu se do udaljenosti 10 cm. Kolik je naboj svake kuglice?

[70·3 el.-st. c-g-s—jed.; izlazi na osnovu sličnosti trokuta]

Zad. 118. Kolika je konstanta Coulombova zakona, ako množinu elektriciteta mjerimo el.-magn. c-g-s—jedinicom? [9×10^{20}]

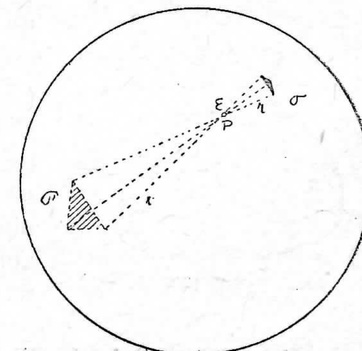
Zad. 119. Kolikom bi se silom privlačila dva tijela udaljena 10 m, kad bi im naboji bili + 1 milikulon i — 1 milikulon? [9×10^6 dina = 9 kg*]

Zad. 120. Jezgra zlatnoga atoma ima naboj $+ 79 \times 4{\cdot}80 \times 10^{-10}$ el.-st. c-g-s— jedinica, a jezgra helijeva atoma naboj $+ 2 \times 4{\cdot}80 \times 10^{-10}$; kolikom se silom odbijaju te jezgre, ako im je razmak 10^{-11} cm? (Takovo zbliženje može nastati, ako u atom zlata udari alfačestica) [360000 din $\doteq$ 1/3 kg*]

Zad. 121. Koliko je elementarnih naboja sadržano u 1 kulonu?

Zad. 122. Kugla s polumjerom 1 dm nabita je na 30000 volta; koliko treba tome elementarnih naboja? [$2 \cdot 1 \times 10^{12}$]

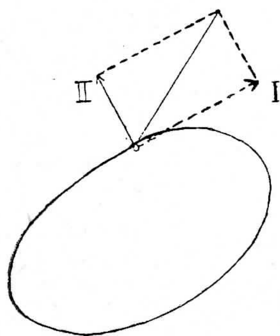
156. Dokaz Coulombova zakona. Coulomb je dokazivao zakon električkih odbojnih i privlačnih sila tako, da ih je ispoređivao u „torzionoj vagi" s elastičnom silom tordirane žice. (Na sličan je način potkrepio i zakon magnetskih sila.) Mnogo se točnije Coulombov zakon dokazuje posredno. Teorija uči, da postoji sveza između Coulombova zakona i tvrdnje, da je elektricitet razmješten samo na površini vodiča; potonje se dade vrlo točno pokusima utvrditi, te otuda onda slijedi, da je i Coulombov zakon valjan (Cavendish 1772.).


Sl. 171.

Spomenuta se sveza lako upoznaje u znatnom primjeru, kad je vodič kugla, koja je udaljena od drugih tjelesa. Gustoća njezina naboja na svim je mjestima površine jednaka. Da se odredi sila, kojom naboj kugle djeluje na neznatan naboj ε u kojojgod unutarnjoj točki P, pomišlja se uska dvostruka piramida, kojoj je vrh P, a osnovke su dijelovi površine kugle sa veličinama σ cm² i σ' cm² (Slika 171.). Ako su te osnovke od vrha udaljene za dužine r cm i r' cm, vrijedi razmjer $\sigma : \sigma' = r^2 : r'^2$ (jer je kod kugle priklon tetive prema površini na oba kraja tetive jednak); kolik je omjer osno- vaka, tolik je i omjer naboja njihovih e i e', dakle je $e : e' = r^2 : r'^2$; odatle slijedi $e/r^2 = e'/r'^2$. No po Coulombovu zakonu naboj e prve osnovke djeluje na naboj ε točke P silom $e\varepsilon/r^2$, a naboj druge osnovke djeluje silom $e'\varepsilon/r'^2$. Te su sile protivnih smjerova, a prema posljednjoj su jednadžbi jednake; one se dakle uništavaju. Isto vrijedi za sile od naboja osnovaka kojegod druge dvostruke piramide s vrhom P. Kako se može sva kugla ispuniti dvostrukim piramidama, izlazi, da elektricitet jednoliko porazmješten na površini kugle ne djeluje na električki naboj u unutarnjosti.

157. Električno polje. Prostor u okolišu električnih tjelesa zove se električno polje. Ako na neku točku P s nabojem $+1$ polje djeluje silom E, kažemo, da je jakost polja u toj točki $= E$. Smjer je polja onaj smjer, u koji polje tjera pozitivni elektricitet. Krivulja, koja svagdje ima smjer polja, zove se električna silnica. (Isp. slične pojmove kod magnetizma.)

Znatan je pojam električna ploha nivoa; to je ploha, koja je svagdje okomita na silnici (poput gravitacijskih ploha nivoa, koje su okomite na polumjerima zemaljskima, gravitacijskim silnicama). Ako se elektrizirana točka pomiče na plohi nivoa, put je svagdje okomit na sili, pa je prema tome radnja, što se troši na pomicanje, $= 0$.

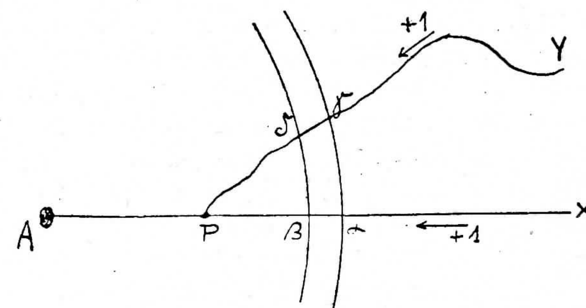


Sl. 172.

Ako elektricitet miruje na vodiču, smjer je polja u točkama površine vodiča okomit na površinu. Kad to ne bi bilo, mogla bi se sila, kojom polje djeluje na električnu česticu površine, rastaviti u komponentu I, koja tiče površinu (sl. 172.), i u komponentu II okomitu na površini; radi sile I elektricitet bi se morao pomicati (elektr. struja!). Tako isto ni na glatkoj kosini ne može tijelo mirovati, jer gravitacijsko polje nije na njoj okomito. — Budući da je površina vodiča okomita na smjeru polja, ona je ploha nivoa.

158. Potencijal (teorija). Ako k pozitivno nabitoj točki (malenom tijelu) A iz velike daljine dovodimo sitan pozitivan naboj sve do točke P

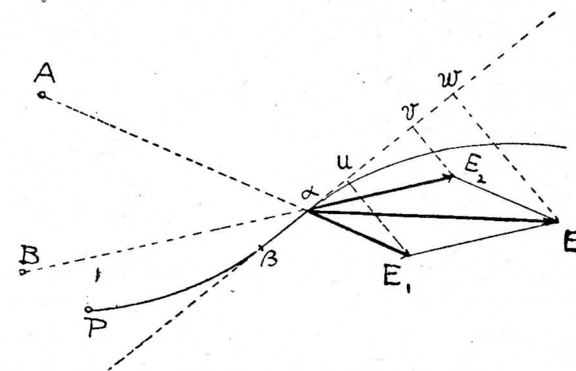
(sl. 173.), izvršit ćemo neku radnju, jer nam valja svladati odbojnu električnu silu. Na svim je putovima, što vode iz velike daljine u točku P, radnja jednaka. Da to utvrdimo, načinimo dvije kugle sa središtem A i neznatno različnim polumjerima. Među površinama kugala leži komadić $\alpha\beta$ ravnog, prema središtu



Sl. 173.

uperenog puta XP i komadić $\gamma\delta$ krivudastoga puta YP. Jakost je polja u točkama α i γ jednaka; kako je radnja umnožak sile i projekcije puta na smjer sile, pa kako je projekcija od $\gamma\delta$ jednaka $\alpha\beta$, izlazi, da je radnja na putu $\gamma\delta$ = radnji na putu $\alpha\beta$. Ako oko središta A opišemo nebrojeno mnogo kugala, putovi se XP i YP rastavljaju u mnogo komadića, te zbrajanjem radnja izvedenih na komadićima poput $\alpha\beta$ i $\gamma\delta$ dobivamo, da je radnja na putu YP = radnji na putu XP.

Ako sitan naboj dovodimo iz velike daljine u točku P polja, što ga izvode dvije nabite točke A i B, radnja je = zbroju radnja, što bi se izvele, kad bi tijelo A ili tijelo B sâmo postojalo. To razabiramo, ako silu αE_1 (sl. 174.), kojom točka A djeluje na sitni naboj, i silu αE_2, kojom točka B djeluje, sastavimo u rezultantu αE. Projicirajmo te sile na smjer komadića puta $\alpha\beta$. Projekcija je rezultante $\alpha w = \alpha v + v w = \alpha v + \alpha u$ dakle jednaka zbroju projekcija komponenata. Množeći sa $\alpha\beta$ dobivamo

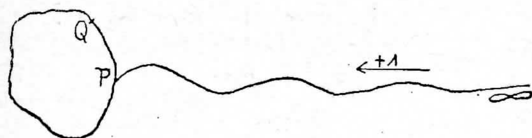


Sl. 174.

$\alpha\beta \cdot \alpha w = \alpha\beta \cdot \alpha v + \alpha\beta \cdot \alpha u$, što znači, da je radnja, koju vršimo na putu $\alpha\beta$ pomičući sitni naboj, jednaka zbroju radnja, što bi ih trebalo vršiti protiv naboja A i B napose. Što vrijedi za komadić puta, vrijedi i za cio put iz daljine do P.

Što vrijedi za jednu ili dvije električne točke A i B, vrijedi i za velik broj točaka; poimence je radnja na svima putovima, što vode iz velike

daljine u određenu točku polja, jednaka. Oslanjajući se na taj poučak postavljamo pojam potencijala. Ako treba izvršiti radnju V erga, da se naboj $+ 1$ el.-st. c-g-s—jed. dovede iz velike daljine u točku P električnoga polja, kažemo, da je „potencijal u točki P" jednak V el.-st. c-g-s—jed. Za dovođenje naboja ε trebala bi onda radnja $R = V \cdot \varepsilon$. Prema tome je potencijal omjer radnje i dovedenoga naboja: $V = R : \varepsilon$.



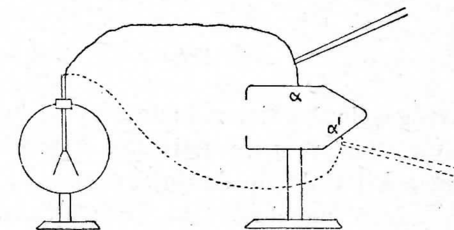
Sl. 175.

Znatnost se pojma potencijala nameće sama sobom, ako se uzme na um, da vodič, kojega elektricitet miruje, ima u svima svojima točkama jednak potencijal. To se dokazuje ovako. Površina je vodiča ploha nivoa; prenosim li naboj $+ 1$ iz velike daljine (∞) u točku P (sl. 175.) površine, izvršujem toliku radnju, kolika bi trebala, da se naboj $+ 1$ donese iz velike daljine u točku P, a onda površinom u Q; na putu PQ ne vrši se naime radnja, jer je put u plohi nivoa. Prema tome je potencijal u točki Q površine vodiča = potencijalu u njezinoj točki P. U unutarnjost vodiča može se naboj $+ 1$ dovesti kroz malen otvor u površini; no kako se uđe pod izvanju površinu, jakost električnoga polja iščezava, ne treba dakle vršiti radnje; prema tome je potencijal unutarnjih točaka tolik kao i potencijal točaka površine. Zajednički potencijal svih točaka vodiča zove se potencijal vodiča. — Na sličan se način zaključuje, da je na svakoj plohi nivoa potencijal stalan, te su plohe nivoa ujedno i plohe stalnoga potencijala.

Ako dovodeći naboj $+ 1$ u neku točku „dobivamo" radnju (to vrijedi kod privlačnih sila), „izvršili" smo negativnu radnju, te potencijal točke zovemo negativnim. Potencijal vodiča ne treba imati predznak, što ga ima naboj; na izoliranom vodiču, koji je influencijom elektriziran, potencijal je stalan, dok je naboj od česti pozitivan a od česti negativan.

Električke pokuse izvodimo u blizini Zemlje, a ova je ogroman elektriziran vodič. Redovno nam nije stalo, da saznamo sam potencijal nekoga vodiča, već dostaje znati, za koliko je potencijal vodiča veći od potencijala Zemlje (t. j. koliku radnju treba vršiti, da se naboj dovede sa Zemlje na vodič). Ako stijene sobe dobro vode elektricitet, naboj izvanje površine zemaljske ne djeluje na tjelesa u sobi, jer se ona — može se reći — nalaze u unutarnjosti Zemlje. Ako je elektriziran vodič u sobi svagdje daleko od stijena, bit će naboj, što je influenciran na stijenama, razasut, te se na njegovo električno polje ne trebamo obazirati. U tom je slučaju radnja kod prenošenja naboja $+ 1$ sa stijena (t. j. sa Zemlje) na vodič tolika, kolika bi bila radnja, kad bi vodič stajao sam u Svemiru, a dovodili bismo spomenuti naboj iz velike daljine. Dakle je razlika potencijala vodiča u sobi i potencijala Zemlje jednaka potencijalu vodiča, kad bi osamljen stajao u Svemiru.

159. Potencijal (pokusi). Elektroskop može se tako upotrebiti, da služi mjerenju potencijala. Zovemo ga onda elektrometrom. Ako izoliran vodič kojegagod oblika tankom žicom sastavimo sa štapom elektrometra i vodič nabijemo, razmak se listića ne će promijeniti, kamogod premjestimo dotačište žice i vodiča (u sl. 176. istaknuta su dotačišta α i α'; kraj je žice učvršćen na oduljem dršku od izolatora). Dolazi to otuda, što elektricitet žice, ako je žica doista tanka, gotovo ništa ne utječe na razmještaj elektriciteta vodiča i elektrometra. Kako je u jednu ruku potencijal različitih točaka α α' vodiča jednak, a u drugu sve te točke redom spojene elektrometrom daju isti razmak listića, razabiramo, da je elektrometar sprava zgodna za mjerenje potencijala; on udovoljuje osnovnom zahtjevu, što ga valja staviti mjeraćoj spravi: jednakim vrijednostima mjerene veličine treba da pripadaju jednaki podaci mjerače sprave. Ako kažemo, da elektrometar mjeri stupanj električnosti (Cavendish), znači to što i potencijal.

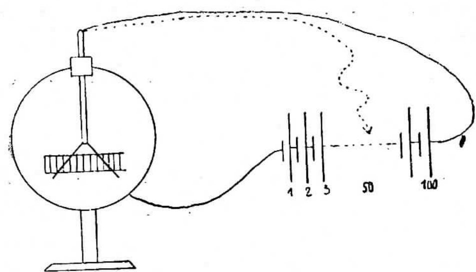


Sl. 176.

Ako se štap elektrometra žicom sastavi sa kućicom, elektrometar stavi na podlogu od izolatora i nabije, listići se ne će razmaći; oni se sada nalaze u unutarnjosti vodiča, kojemu i sami pripadaju, nemaju dakle naboja, te se ne odbijaju. Potencijal je listića sada jednak potencijalu kućice, a razlika je tih potencijala = 0; kako je i razmak listića = 0, izlazi, da je elektrometar sprava, kojom se mjeri razlika potencijala vodiča spojenoga s listićima i potencijala kućice. Ako je kućica žicom spojena sa Zemljom, a to obično i jest, elektrometar mjeri razliku potencijala nekoga vodiča i potencijala Zemlje.

Kada kućica elektrometra ne bi bila od vodiča, ne bi vrijedilo to zaključivanje; slučajni naboji kućice utječu onda na razmak listića načinom, koji je teško ispitati.

Razlika potencijala zove se često i napetost (Volta 1796.), jer podsjeća na mehaničku napetost. Ako je naime mehanička napetost plina prevelika, razbit će stijene; ako je pak električna napetost između dva vodiča prevelika, preskočit će iskra i probiti izolator, što rastavlja vodiče.



Sl. 177.

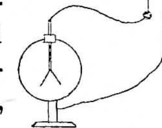
Elektrometar treba baždariti, to će reći: treba odrediti za svaki razmak listića, kolika mu razlika potencijala pripada. Radi se to uz pomoć baterije od mnogo (makar nekoliko stotina) malenih, jednakih, izoliranih galvanskih članaka (u sl. 177. galvanski je članak shematično predočen sa dvije usporedne crte nejednake dužine). Negativni „pol" prvoga članka žicom sastavimo sa kućicom elektrometra, pozitivni pol prvoga članka sa negativnim drugoga, pozitivni pol drugoga s negativnim trećega i t. d. do krajnjega članka. Između polova svakoga članka vlada određena napetost (isp. kasnije), tako da napredujući u nizu članaka počevši od prvoga potencijal iza svakoga članka naraste za jednaku veličinu. Ako sada jedamput pozitivni pol 50. članka sastavimo sa listićima elektrometra, drugi put pozitivni pol 100. članka, napetost, što je mjerimo, u potonjem je slučaju dvostruka. Na taj se način elektrometar može po volji nabiti do razlike potencijala, koja je određeni mnogokratnik napetosti jednoga članka. Ako onda u tablici pobilježimo, kolik razmak listića elektrometra pripada određenom broju članaka, možemo kasnije na osnovu te tablice s pomoću elektrometra kojugod napetost isporediti s napetošću galvanskoga članka baterije upotrebljene kod baždarenja. Sveza između razmaka listića i napetosti može se također grafički predočiti na koordinatnom papiru (krivulja baždarenja). Najzgodnije je, kad već sama ljestvica elektrometra kazuje vrijednosti napetosti.

160. Jedinice potencijala. Češće negoli el.-st. c-g-s—jedinica potencijala (i napetosti) upotrebljava se praktična jedinica; ona se zove volt, a određena je u skladu sa praktičnim jedinicama radnje i naboja, džulom i kulonom, s obzirom na jednadžbu $V = R : \varepsilon$ (isp. § 158.). Ako u desnu stranu te jednadžbe uvrstimo radnju 1 džul i naboj 1 kulon, izlazi napetost izražena voltima, dakle 1 : 1 = 1 volt; uvrstimo li iste veličine izražene el.-st. c-g-s—jedinicama dakle $R = 10^7$ erga, $\varepsilon = 3 \cdot 10^9$ el.-st. c-g-s—jed., dobiva se ista napetost u el.-st. c-g-s—jedinicama, dakle $\frac{10^7}{3 \cdot 10^9} = \frac{1}{300}$ el.-st. c-g-s—jed. Prema tome je 1 volt = $^1/_{300}$ el.-st. c-g-s—jed.

Elektrometar se baždari u voltima s pomoću baterije Westonovih (normalnih) članaka; napetost je takvoga članka 1·0183 volta.

Iz električnih središnjica ili munjara idu k trošiocima po dvije izolirane žice, između kojih vlada razlika potencijala. (U sl. 178. natuknuto je, kako se od glavnih vodova PP' i QQ' odvajaju vodovi, što idu k pojedinim trošiocima.) Kod mnogih je munjara napetost električnih vodova stalna, pa iznosi na pr. 220 volta, te je možemo elektroskopom pokazati (v. sl.). Još više munjara daje napetost, koja je periodički promjenljiva; čas je potencijal PP' veći od potencijala QQ', čas manji; napetost se mijenja između najveće pozitivne i apsolutno jednake najveće negativne vrijednosti. Kad bi izmjene napetosti sporo slijedile, listići bi se elektroskopa naizmjence razilazili i sastajali, no izmjene su napetosti brze (na pr. 50 perioda u sek, t. j. 100 izmjena predznaka u sek), pa se listići zbog tromosti umire u nekom srednjem razmaku. Ako je taj razmak tolik, kolik bi bio, da mjerimo stalnu napetost na pr. 220 volta, kažemo, da je srednja vrijednost izmjenične napetosti ili kraće „izmjenična napetost" 220 volta.

P P' Q Q'



Sl. 178.

Napetost između gornjega voda struje električnoga tramvaja i tračnica često iznosi kojih 550 volta (opasno!) i stalna je. — Da preskoči s jednoga vodiča na drugi iskra duga 1 mm (u uzduhu običnoga tlaka), treba napetost od kojih 5000 volta, iskra dužine 1 cm treba do 30000 volta.

Zad. **123.** Pokažite, da je 1 volt = 10^8 el. magn. c-g-s—jedinica (isp. § 155.).

161. Potencijal i polje. Neka su α i β dvije neznatno razmaknute točke na istoj silnici, V_α potencijal u prvoj, V_β potencijal u drugoj. Razlika je potencijala $V_\alpha - V_\beta$ jednaka radnji, koju izvodimo, kada prenosimo naboj + 1 iz točke β u točku α. Ako je jakost polja E, vrijedi dakle $V_\alpha - V_\beta = E \cdot \alpha\beta$ ili

$$E = (V_\alpha - V_\beta) : \alpha\beta.$$

Po toj se jednadžbi može jakost polja izračunati, ako je razlika potencijala poznata.

Električnom su potencijalu slični pojmovi „magnetički potencijal" i „gravitacijski potencijal". Svezu između potencijala i jakosti polja kod gravitacije ističe Lagrange (1773.); Gauss iznosi (1838.) svezu potencijala s radnjom i uvodi ime „potencijal" (t. j. pojam, koji je u svezi s jakošću, lat. *potentia*).

162. Potencijal u polju točke i kugle. Potencijal u točki P (sl. 173.) polja elektrizirane točke A nalazi se ovako. Naboj e točke A djeluje na naboj + 1 silom $e \cdot 1/r^2$, ako je r razmak njihov; na komadiću puta $\alpha\beta = \Delta r$

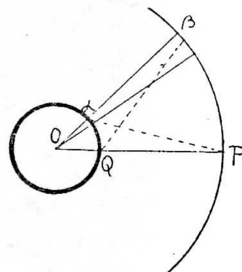
treba dakle kod prenošenja naboja $+1$ vršiti radnju $e \cdot \Delta r/r^2$. Sva je radnja na putu iz velike daljine do P jednaka $\int_{AP}^{\infty} \frac{e \cdot \Delta r}{r^2}$, gdje znak pred razlomkom znači zbrojidbu: treba zbrojiti radnje za sve sitne komadiće puta, koji leže između točke P $(r = AP)$ i vrlo udaljene točke $(r = \infty)$. Izlazi [integralnim računom] e/AP.

Kuglastom se vodiču potencijal ovako određuje. Neka je ρ polumjer, e naboj kugle. Svi su dijelovi e_1, e_2, $e_3 \ldots$ naboja jednako udaljeni od središta, jer je naboj na površini. Dakle je potencijal u središtu

$$\frac{e_1}{\rho} + \frac{e_2}{\rho} + \frac{e_3}{\rho} \ldots = \frac{e}{\rho}.$$

Budući da je potencijal u vodiču svagdje jednak, izlazi, da je **potencijal kugle u točkama te kugle jednak omjeru naboja i polumjera.**

Da se nađe potencijal, što ga nabita kugla sa središtem O izvodi u **izvanjoj** točki P, zamislimo kuglu, koja je koncentrična sa danom kuglom, a prolazi točkom P (sl. 179.). Spojnica OP zgađa površinu dane kugle u točki Q. Zamislit ćemo na pomoćnoj kugli rasprostrt naboj, koji je jednak naboju zadane kugle, i isporediti potencijal, što ga pomišljani naboj izvodi u točki Q, s potencijalom, što ga pravi naboj doista izvodi u točki P. U tu svrhu načinimo usku piramidu, koja iz površine prave kugle izreže komadić α, a iz površine pomišljane kugle komadić β. Kako je naboj na α jednak naboju na β, a razmak $\alpha P =$ razmaku $\beta\, Q$, izvodi naboj od α u točki P tolik potencijal, kolik i naboj od β u točki Q. Potencijali, što ih kugle izvode, dobiju se, ako se potencijali, što potječu od pojedinih dijelova α ili β, zbroje; budući da su pribrojnici u oba zbroja redom jednaki, bit će i zbrojevi jedan drugomu jednaki, t. j. potencijal u točki P jednak je potencijalu, što bi ga pomišljani naboj izvodio u točki Q. Potonji smo potencijal odredili u pređašnjem razmatranju; on je $= e : OP$. Prema tome je **potencijal, što ga izvodi kuglast vodič u izvanjoj točki, tolik, kolik bi bio, da je sav naboj kugle združen u središtu.** Sličan poučak vrijedi za jakost polja, jer je potencijalom i polje određeno.



Sl. 179.

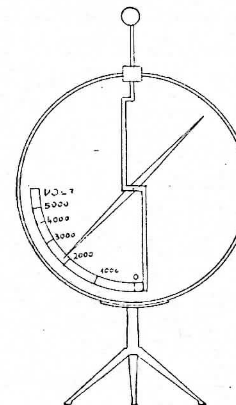
Dobiveni se rezultat osniva na Coulombovu zakonu; kako za gravitaciju vrijedi sličan zakon, razabiramo, da tanka kuglasta ljuska stalne debljine i gustoće privlači poradi gravitacije izvanja tjelesa tako, kao da je sva masa ljuske združena u središtu. Otuda slijedi, da i masu homogene kugle možemo, kad se radi o privlačenju izvanjih točaka, pomišljati svu u središtu. (Isp. § 43.)

Zad. **124.** Dvije koncentrične šuplje kovne kugle tankih stijena imadu polumjere 6 cm i 10 cm, unutarnja ima naboj $+180$ el.-st. c-g-s—jed., izvanja -60; kolika je jakost polja 1) u manjoj kugli? 2) u prostoru među kuglama? 3) izvan veće kugle? kolik je potencijal?

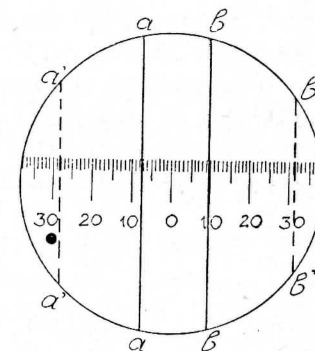
Zad. **125.** Neka se rezultati pređašnjega zadatka predoče grafički; apscise — razmaci od središta, ordinate — jakosti polja ili potencijali.

Zad. **126.** Elektriziran kuglast vodič ima polumjer ρ; u kojoj je udaljenosti x od površine polje za 1% slabije negoli tik površine? [$x = \rho/200$]

163. Elektrometri. Elektroskop sa staklenom **kućicom** načinio je **Cavallo** (1777.); zlatne **listiće** uveo je **Bennet** (1787.); da kućica elektrometra mora biti od kovine, razabrao je **Faraday** (1837.). — Ima mnogo raznovrsnih elektrometara. U **Braunovu** se **elektrometru** (1887., sl. 180.) aluminijeva igla odbija od štapa, koji nosi os igle; ljestvica je baždarena u voltima, a znade sezati do nekoliko tisuća volta. **Wulfov** elektrometar (1907.) ima u sitnom razmaku dvije vertikalne fine niti od kvarca; niti su prevučene nježnim slojem kovine, jer kvarc izolira; učvršćene su gornjim krajevima na štapiću elektrometra, a donjima na elastičnom izolatoru, koji je pričvršćen na dnu kućice. Kad se niti nabiju, izobliče se, ali im srednji dijelovi pri tome ostanu usporedni; te srednje dijelove motrimo mikroskopom. U sl. 181. prikazano je vidno polje toga elektrometra (aa, bb jesu niti, kada nema naboja; $a'\,a'$, $b'\,b'$ niti u nabijenom stanju). — Bar po imenu spomenimo glasoviti **kvadrantni** elektrometar (**Will. Thomson**, prije g. 1867.). Mogu se njime mjeriti napetosti manje i od 0·001 volta.



Sl. 180.



Sl. 181.

164. Kapacitet. Velikom izoliranom vodiču treba dovoditi veći naboj negoli malenom, ako ih želimo nabiti na jednake potencijale. Kažemo, da velik vodič ima veći „**kapacitet**“ ili veću sposobnost da primi naboje negoli maleni (nalik tome možemo za široku posudu, koju punimo vodom, reći, da ima veći „prostorni kapacitet“ negoli uska posuda, jer kraj jednakih visina u širokoj je posudi više vode negoli u uskoj; lat. *capacitas, sposobnost obuhvatanja*). Točnije se određuje pojam kapaciteta ovim razmatranjem.

Ako se vodič nabija elektricitetom, potencijal raste razmjerno s nabojem e; kad se naboj podvostruči, podvostruči se svagdje u prostoru sila, kojom vodič djeluje na naboj $+1$, dakle i radnja kod dovođenja toga naboja, podvostruči se prema tome i potencijal V. Ta se razmjernost izražava jednadžbom

$$e = C \cdot V,$$

gdje je C konstanta razmjernosti. Kod velikog vodiča C je veliko, kod sitnoga maleno, jer uz jednako V treba da izađe umnožak $C \cdot V$ kod velikoga vodiča velik, kod sitnoga neznatan. Opravdano je dakle, da se upravo konstanta C zove kapacitetom vodiča. Ako nekom vodiču treba dovesti 2

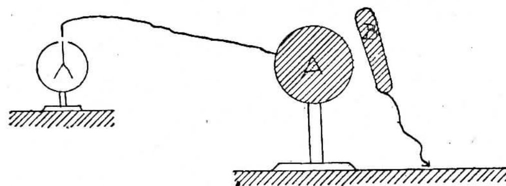
puta toliko elektriciteta koliko drugomu, da ih nabijemo na jednake potencijale, prvi vodič ima 2 puta veći kapacitet negoli drugi. U drugu ruku kraj jednakih naboja različitih vodiča potencijal je obrnuto razmjeran kapacitetu, te vodič dvostrukog kapaciteta ima samo polovicu potencijala.

Kapacitet vodiča stoji do njegove veličine, a i do oblika. Kapacitet se vodiča u obliku kugle s polumjerom ρ izračunava, ako se u jednadžbu $C = e : V$ uvrsti $V = e : \rho$ (isp. § 162.). Dobiva se $C = \rho$. Prema tome kugla dvostrukoga polumjera ima dvostruk kapacitet, pa je kapacitet razmjeran polumjeru (Cavendish). Dobiveni rezultat čak kaže, da je kapacitet kugle izražen onim brojem, kojim i polumjer; dolazi to otuda, što su pri izvođenju izraza za potencijal V upotrebljene el.-st. jedinice. Prema tome može se el.-st. jedinica kapaciteta zvati „centimetar", no pri tom valja imati na umu, da je kapacitet pojam bitno različan od dužine. Kažemo dakle: kugle s polumjerima 8 cm, 25 cm .... imadu kapacitete 8 cm, 25 cm .....

U praktičnom je sustavu jedinica kapaciteta 1 farad; to je kapacitet vodiča, koji se množinom elektriciteta 1 kulon nabija na potencijal 1 volt. Ako se u jednadžbu $C = e : V$ stavi $e = 1$ kulon, $V = 1$ volt, slijedi $C = 1 : 1 = 1$ farad; uvrste li se iste veličine izražene el.-st. jedinicama, dobiva se kapacitet $C = 3 \cdot 10^9 : \frac{1}{300} = 9 \cdot 10^{11}$ el.-st. c-g-s—jed. ili cm. Dakle je 1 farad $= 9 \cdot 10^{11}$ cm. Prema tome kugla s kapacitetom 1 farad ima polumjer $9 \cdot 10^{11}$ cm = 13 polumjera sunčanih; očito je farad jedinica nezgodno velika; ona se upotrebljava, da ostanu neke znatne jednadžbe jednostavne. Najobičnije su jedinice kapaciteta 1 cm i 1 mikrofarad; 1 mikrofarad = 0·000001 farada = 900000 cm.

Zad. **127.** Neka se kapacitet Zemlje izrazi mikrofaradima; kvadrant meridijana dug je 10000 km. [707 mikrofarada]

Zad. **128.** 8 kapljica s polumjerima 0·1 cm neka je porazmješteno u velikim razmacima i svaka je nabijena na potencijal 3000 volta; kolik je kapacitet, kolik potencijal kapljice, koja nastane, kad se svih 8 kapljica združi? [0·2 cm, 12000 volta]

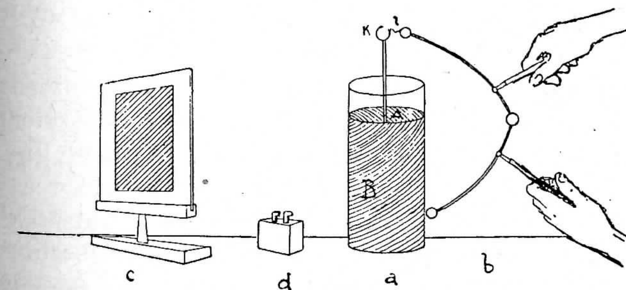


Sl. 182.

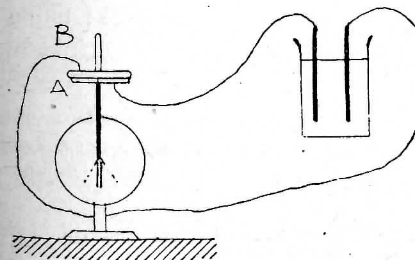
U dosadanjem se razmatranju uzelo, kanda je vodič sam u Svemiru; no ako je vodič u sobi, dosta daleko od stijena, napetost između vodiča i Zemlje prema § 158. znači isto što i potencijal osmljenoga vodiča. Jednadžba $e = C \cdot V$ vrijedi dakle i onda, ako za V stavimo spomenutu napetost.

Ako se vodič u sobi približi stijenama, kapacitet se mijenja. Izoliranom nabitom vodiču A (sl. 182.), koji je spojen žicom s listićima elektrometra, približimo ruku ili drugi vodič B, koji je spojen sa Zemljom. Elektricitet influenciran u B vuče elektricitet tijela A, te se ovaj sabire bliže tijelu B i naboj se i razmak listića umanje. Elektrometar dakle pokazuje sada, da se napetost V između tijela A i Zemlje umanjila. Kako ništa elektriciteta nije s vodiča otišlo, pa je naboj e ostao nepromijenjen, treba prema gornjoj jednadžbi uzeti, da je kapacitet C postao veći.

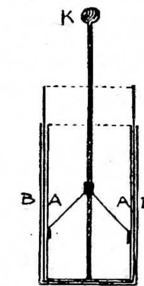
165. Kondenzatori. Ako dvije kovne ploče ili dva kovna lista stoje jedan blizu drugome, a da se ipak ne dotiču, pa ako je jedan od tih vodiča spojen sa Zemljom, kapacitet je drugoga velik (isp. pređašnji §); on će dakle kod određene napetosti primiti mnogo elektriciteta, pa zato i služi za sabiranje električnih naboja. Sprave za sabiranje elektriciteta zovu se kondenzatori (lat. *condenso, zgušćavam*). Ima ih raznovrsna oblika. Najstariji kondenzator je lajdenska boca (sl. 183. a; Kleist 1745., pokusi u Leidenu 1746.). Čaša od stakla (izolatora) jednake debljine obložena je na unutarnjoj i na izvanjoj površini svoje stijene listovima od stanijola; ti oblozi svagdje stoje jedan prema drugome, a prestaju u nekom razmaku od ruba čaše. Izvanji je oblog B u svezi sa Zemljom, k unutarnjem A vodi kovni štap sa kuglicom K, kroz koji se oblog A nabija ili izbija (sl. 184. prikazuje prorez lajdenske boce). Ako se oveća lajdenska boca nabita na pr. do 2000 volta dotakne jednom rukom na izvanjem oblogu, a prst se druge ruke dovoljno približi kuglici K, izbit će se boca kroz tijelo i oćutjet ćemo neugodan trzaj. „Izbijačem" (sl. 183. b) može se izbiti i jače nabijena boca; pri tome se vidi sjajna iskra i i čuje prasak. Dužina iskre stoji ponajpače do napetosti naboja, sjaj njezin još i do kapaciteta boce.



Sl. 183.



Sl. 185.



Sl. 184.

Ako je boca odviše nabita, preskoči iskra slomljenim putem skližući se preko ruba uz površinu stakla; no može se dogoditi i to, da iskra probije staklo i bocu pokvari. — Franklinova ploča (1749.) samo se oblikom razlikuje od lajdenske boce (sl. 183. c).

Uz pomoć Voltina kondenzatora (1783.) može se elektroskopom pokazati i malena napetost, koja se običnom primjenom elektroskopa ne bi dala opaziti. Na štap elektrometra pričvršćena je ploča A kondenzatora (sl. 185.); ona ima na gornjoj strani tanak sloj pokosti (izolatora); ploča B kondenzatora može se po volji ukloniti ili opet dodati. Tu ploču spojimo sa kućicom elektrometra t. j. sa zemljom, ploču A s vodičem, kojega napetost želimo ispitati; neka to bude na pr. pozitivni pol galvanskoga članka, kojemu je negativni pol spojen sa zemljom. Kako je napetost članka neznatna, listići običnoga elektroskopa ne će je odavati, no ipak je naboj vodiča A znatan, jer mu je kapacitet velik. Ako se sada spoj ploče A sa članKom prekine, a onda ploča B ukloni, kapacitet se ploče smanji, te napetost naraste toliko, da se listići jasno razmaknu. (Elektricitet, što je bio vezan na gornjoj strani ploče A, raširio se sad posvuda, dakle i na listiće.)

Ako se dvije duge tanke vrpce od stanijola, kojih je svaka obložena s obje strane parafiniranim papirom, slože i smotaju, dobije se kondenzator velikog kapaciteta, a malenoga obujma. U sl. 183. d prikazan je takav „papirnati kondenzator“ sa kapacitetom 2 mikrofarada, dok mnogo veća lajdenska boca u istoj slici ima samo 0·002 mikrofarada; doduše lajdenska boca podnosi možda stotinu puta veću napetost nego li papirnati kondenzator, koji se već kod manje napetosti probije i pokvari.

U radiotelegrafiji mnogo se upotrebljava kondenzator na vrtnju, kojemu možemo kapacitet postepeno mijenjati.

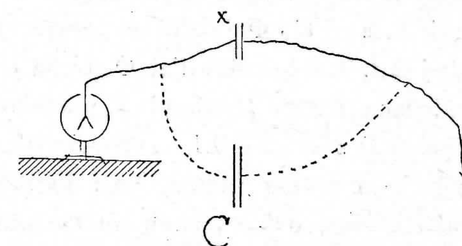
Kondenzatori mogu se sastavljati u baterije. Lajdenska se baterija obično tako sastavi, da se unutarnji oblozi svih boca spoje u jedan vodič, a boce postave na kovnu ploču, koja je u svezi sa zemljom. Kapacitet tako sastavljene baterije jednak je zbroju kapaciteta pojedinih kondenzatora. Takva baterija ima jednaku granicu za napetost kao i pojedina boca; naboj je baterije od 7 boca kod najveće dopuštene napetosti 7 puta veći negoli naboj 1 boce.

Budući da i najbolji izolator donekle vodi elektricitet, prelazi naboj kondenzatora s obloga lagano u izolator. Tom zamršenom pojavu treba pripisati, što lajdenska boca, koju smo izbili, nakon nekog vremena pokazuje „ostatak“ elektriciteta. Udarac pri izbijanju takvog ostatka znade biti vrlo jak.

Zad. 129. 10 jednakih lajdenskih boca, svaka s kapacitetom 2000 cm sastavljeno je u bateriju; kolik je njezin kapacitet izražen mikrofaradima?

Zad. 130. Koliko kondenzatora sa kapacitetom 2 mikrofarada treba sastaviti u bateriju, da kod napetosti 2000 volta bude naboj 0·1 kulon?

166. Određivanje kapaciteta. Da se isporedi kapacitet x mikrofarada nekoga kondenzatora s kapacitetom C drugoga (u sl. 186. je svaki kondenzator simbolički predočen sa dvije jednake usporedne crte), sastavimo prvi kondenzator s elektrometrom, nabijmo ga i pročitajmo napetost V volta. Ako je kapacitet elektrometra neznatan prema x, električki je naboj $x \cdot V$ mikrokulona. Pripoji li se sada ispitivanom kondenzatoru onaj, s kojim ga ispoređujemo (s pomoću žica, koje su u crtnji prekinutim crtama naznačene), naboj se $x\,V$ razdijeli na oba kondenzatora.



Sl. 186.

Kapacitet je združenih kondenzatora $x + C$, pa ako elektrometar sada pokazuje napetost V', naboj se može bilježiti $(x + C) \cdot V'$. Budući da se množina elektriciteta nije promijenila, vrijedi jednadžba $(x + C) \cdot V' = x \cdot V$, iz koje slijedi $x = \frac{V'}{V - V'} \cdot C$.

Kapacitet kondenzatora je to veći, što je veća površina obloga i što je manji razmak njihov. Uz to utječe na kapacitet još i izolator, koji luči obloge. Ako uzduh među oblozima zamijenimo parafinom, kapacitet se podvostruči. Broj, koji kazuje, koliko se puta poveća kapacitet kondenzatora, kad se uzduh među oblozima ukloni i zamijeni drugim izolatorom, zove se konstanta dielektričnosti toga izolatora. Konstanta je dielektričnosti parafina 2, običnoga stakla 5—7, ebonita 3. Faraday je otkrio (1838.) taj utjecaj izolatora i upoznao, da upravo izolatori prenose električnu silu, te su oni „dielektrična tjelesa“ (grč. διά, kroz); električna sila nije „actio in distans“ (isp. § 51.).

Ako je konstanta dielektričnosti D, površina svakoga obloga p, razmak obloga δ, vrijedi približno

$$C = D \cdot p/4\pi\delta \text{ (el.-st. c-g-s-jed.!).}$$

Zad. 131. Površina obloga lajdenske boce je 384 π cm², kapacitet 0·00267 mikrofarada, debljina stakla 2·7 mm; kolika je konstanta dielektričnosti stakla? [6·8]

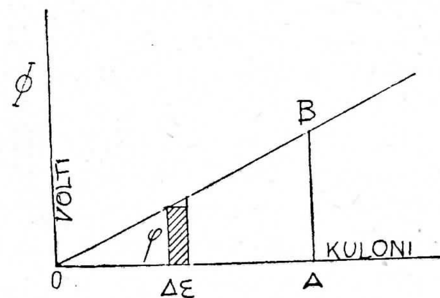
167. Energija električnoga naboja. Naboji, kada se privlače ili odbijaju, podjeljuju tjelesima kinetičke energije; kad se lajdenska boca izbije, možemo vidjeti svjetlost i čuti prasak. Ti i drugi učinci pute nas, da i samom električnom naboju pripišemo (potencijalnu) energiju. Ta energija potječe od radnje kod nabijanja. Da odredimo energiju naboja, zamislit ćemo način nabijanja, za koji se radnja nabijanja dade najlakše odrediti. Na osamljenu vodiču kapaciteta C farada neka isprva ne bude ništa elektriciteta, svi naboji neka su razasuti u silnim daljinama. Dovedu li se na

vodič redom sitni naboji $\Delta \varepsilon$ kulona, postepeno raste naboj ε vodiča, a s time i potencijal Φ volta; ako naboje ε predočimo kao apscise pravokutnog koordinatnog sustava, a potencijale Φ kao ordinate, sveza je naboja i potencijala $\varepsilon = C \cdot \Phi$ predočena pravcem OB (sl. 187.). Da se dovede sitni naboj $\Delta \varepsilon$, kad je potencijal Φ, treba izvršiti radnju $\Phi \cdot \Delta \varepsilon$; ona je u crtnji predočena uskim (šrafiranim) pravokutnikom. Kad je naboj narastao do vrijednosti $\varepsilon = e = OA$, a potencijal do vrijednosti $\Phi = V = AB$, izvedena je u svemu radnja, koja je predočena zbrojem površina svih uskih pravokutnika, dakle površinom trokuta $OAB = \frac{1}{2} \cdot OA \cdot AB = \frac{1}{2} \cdot e \cdot V$ džula. Ako se odatle na osnovu jednadžbe $e = C \cdot V$ izbaci bilo e bilo V, dobiju se još dvije formule, te imamo, da je radnja utrošena na nabijanje vodiča, a prema tome

$$\textit{energija naboja} = \tfrac{1}{2} \cdot eV = \tfrac{1}{2} \cdot CV^2 = \tfrac{1}{2} \cdot e^2/C.$$

(Isp. slično izvođenje u § 51.).

Iste formule vrijede, kad V znači napetost kondenzatora. Iz njih čitamo (kako?) ovo: 1.) ako naboj vodiča podvostručimo, energija se naboja početverostruči; 2.) baterija od 7 lajdenskih boca ima 7 puta veću energiju negoli 1 boca kod jednake napetosti; 3.) baterija od 7 boca ima $\frac{1}{7}$ energije jedne boce kod jednakih naboja. Ako se nabita lajdenska baterija izbije kroz vod, kojega je malen dio tanka žica, tanka se žica ugrije (ili čak usja i rastali), pa se gotovo sva energija naboja pretvori u toplinsku energiju. Kod Riessova aparata ta toplina mjeri rastezanjem uzduha, koji okružuje žicu; s njime je Riess našao zakone za energiju naboja još prije (1837.) nego što je otkriven opći zakon energije.

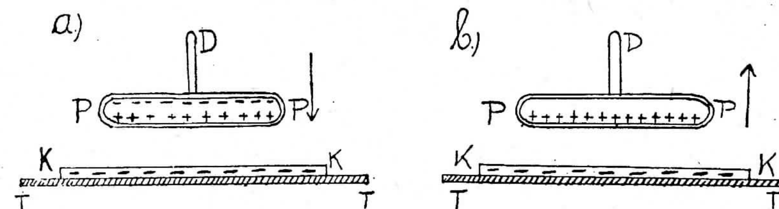


Sl. 187.

Zad. 132. Kondenzator od 2 mikrofarada nabit je na 300 volta, a lajdenska baterija od 0·02 mikrofarada ima jednak naboj; kolike su energije naboja u oba primjera?
[0·09 džula, 9 džula]

Zad. 133. Željezna žica s promjerom 0·17 mm i dužinom $5\frac{1}{2}$ cm užari se time, što se kroz nju izbije baterija kapaciteta 0·02 mikrofarada; koju vrijednost treba da napetost baterije premaši, da se žica ugrije za 700°; spec. težina željeza 8, spec. toplina željeza 0·15, 1 gkal = 4·2 džula.
[21000 volta]

168. Elektrofor. Električni naboj može influencijom stvarati kolikogod želimo drugih naboja. Jednostavna sprava, koja služi toj zadaći, jest



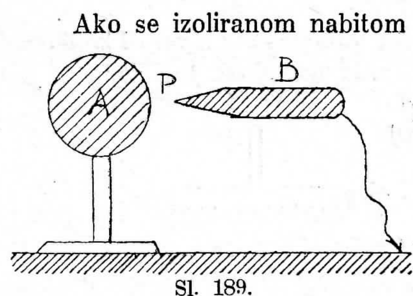
Sl. 188.

elektrofor (Volta 1775.; φέρω, *nosim*). Na limenom tanjuru TT (sl. 188. a) nalazi se "kolač" od ebonita KK, koji trenjem ili „šibanjem" elektriziramo negativno. Metne li se na kolač limeni „poklopac" PP sa drškom D od izolatora, sabrat će se influencijom na donjoj strani poklopca pozitivni elektricitet, na gornjoj negativni. Influencirani negativni elektricitet odvest ćemo u zemlju (dotaknuvši poklopac prstom). Dignemo li iza toga poklopac, možemo njegov pozitivni naboj upotrebiti za kojigod pokus. To se može ponoviti, te dobivamo veliku množinu elektriciteta, a da ipak kolaču naboja ne smanjimo. (Treba međutim primjetiti, da kolač nije savršen izolator, te mu se naboj vođenjem gubi.)

Pita se, odakle je električna energija, što je imaju oni nebrojeni naboji poklopca. Kad se spušta poklopac, naboj kolača privlači bližnji influencirani naboj poklopca, a odbija udaljeniji naboj, te izlazi slaba privlačnost (sl. a). Kod dizanja poklopca (sl. b) nema odbojne sile, pa je privlačnost jaka. Kod spuštanja radnja se dobiva (ako upotrebimo zgodan mehanizam), kod dizanja radnju vršimo; veća je dakle radnja, što je vršimo negoli ona, što je dobijemo; a od viška radnje nastaje energija naboja.

169. Djelovanje šiljeva. Ako izoliran vodič imade oštar šiljak (na izbočenu mjestu, a ne u šupljini), ne možemo ga elektrizirati do iole jače napetosti. Objašnjava se to ovako. U uzduhu ima vazda sitnih pozitivno ili negativno elektriziranih čestica; zovu se ioni. Kad bi elektrizirano tijelo stajalo na nozi od makar kako savršenoga izolatora, ipak bi svoj naboj lagano gubilo, jer privlači ione, koji imadu naboj protivne vrsti, a odbija ione s istovrsnim nabojem; privučeni ioni postepeno uništavaju naboj tijela. Ako je električno polje tijela osobito jako, ioni dobivaju znatne brzine, udarcima kidaju molekule zraka i stvaraju nove ione, te se naboj zbog obilja iona pogotovu brzo gubi. No kad dovodimo elektricitet vodiču, koji ima oštar šiljak, dobit će se već kod malene napetosti na šiljku dosta elektriciteta (§ 150.), da u obližnjem uzduhu polje toliko ojača, te se uzduh brzo „ionizira" i postane dobar vodič. Prema tome što je oštriji šiljak, to je manja napetost, do koje se može vodič nabiti.

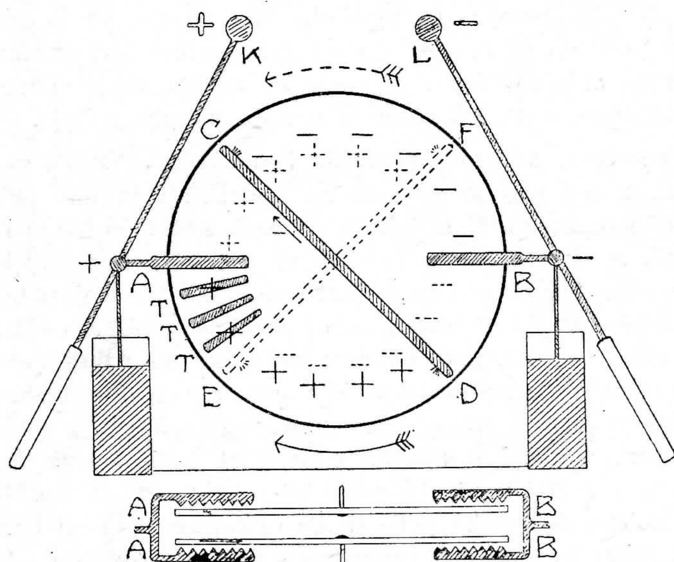
Ako se izoliranom nabitom vodiču *A* (sl. 189.) približi šiljak *B* vodiča, koji je spojen sa zemljom, tijelo će gubiti naboj, kao da i samo imade šiljak. Na šiljku je velika gustoća influenciranoga elektriciteta, zato je i jako polje u prostoru *P* između tijela *A* i šiljka, pa ioni naskoro unište naboj. Ukratko: šiljak se ovdje vlada kanda siše elektricitet. — Ako je šiljak *B* izoliran, ostat će na njegovoj obloj strani influencirani elektricitet, koji je istoga predznaka kao i elektricitet tijela *A*, pa će zato u prostoru *P* polje biti slabije negoli u pređašnjem slučaju. Sve da je i šiljak savršeno oštar, ipak bi sada preostao naboj na vodiču *A* i istovrsni naboj na udaljenijoj strani vodiča *B*. Oba ta vodiča i uzduh među njima kanda sada čine jedan jedini vodič, te im je potencijal prema tome svuda jednak (§ 153.). Isto tako može se i općenije reći, da šiljak poprima potencijal obližnjega uzduha.



Sl. 189.

170. Električni strojevi. Brzom i spretnom dobivanju naboja služe osobiti električni strojevi. Kod strojeva sa trenjem trajnom se vrtnjom izvodi trenje, a trenje daje elektricitet. Isprva su trli sumpornu kuglu, koja se vitjela, onda staklenu kuglu, zatim zamijeniše kuglu valjkom, a najposlije pločom. Isprva je kao „trlo" služila suha ruka, onda vuna, koža, pa koža namazana amalgamom. Naboje hvatahu neposredno s elektriziranoga izolatora, kasnije izumiše „češljeve", t. j. u red postavljene šiljke, koji „sišu" naboj s izolatora, pa ga vode na izolirane „konduktore" (lat. *conduco, dovodim zajedno*).

Mnogo brže stvaraju elektricitet strojevi na influenciju (izumioci: Holtz 1864. i drugi). Kod Wimshurstova se stroja (1878.) oko zajedničke osi vrte dvije jednake ebonitne ili staklene ploče suprotnim smjerovima, a jednakim brzinama; razmak je ploča neznatan. Prednja je ploča na prednjoj strani obložena radijalnim trakovima od stanijola, koji su jednako razmaknuti (u sl. 190. su samo tri traka T nacrtana); isto je tako obložena stražnja ploča na stražnjoj strani stroja. Na kraju horizontalnih promjera stoje ispred prednje i iza stražnje ploče u svemu 4 kovna češlja. Lijevi prednji i stražnji češalj *AA* spojeni su jedan s drugim i s lijevim konduktorom *K*, desni prednji i stražnji češalj *BB* s desnim konduktorom *L*. Konduktori mogu se sastaviti ili razmaći. Ispred prednje i iza stražnje ploče nalaze se po jedan „dijametralni ili poprijećni vodič" *CD* i *EF*; „četkice" na njihovim krajevima tiču nasuprotne trakove ploča; svaki je poprijećni vodič u smjeru vrtnje bliže mu ploče zakrenut prema horizontali za šiljat kut. — Strelice naše crtnje prikazuju smjerove vrtnje; izvučene strelice i izvučeni predznaci vrijede za prednju ploču, crtkani za stražnju.

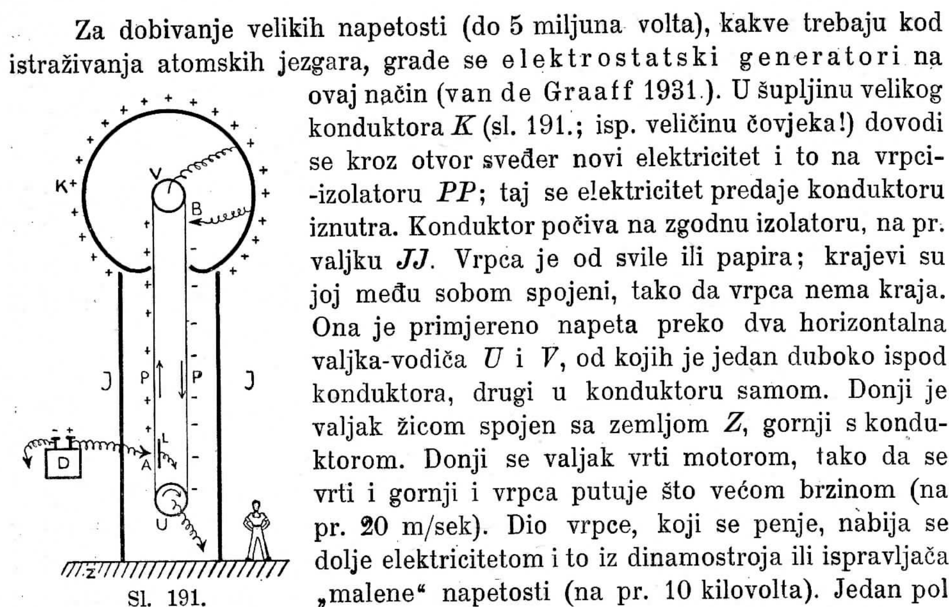


Sl. 190.

Kad stroj počne raditi, influencijom se od malenih naboja, što nastanu trenjem, stvaraju sve jači naboji, a do slučaja stoji, koji će konduktor postati pozitivno električan, koji negativno. Konduktor je *K* pozitivan, kad češljevi *AA* puštaju negativni elektricitet na pozitivne naboje, koje prednja ploča odozdo donosi, a stražnja odozgo. (+)-naboj stražnje ploče kod *C* i (—)-naboj kod *D* izvode u prednjem poprijećnom vodiču *CD* influenciju, te u vodiču *CD* neprestance teče negativni elektricitet (elektroni, § 153.), koji dolazi s prednje ploče kroz četkicu kod *D* i prelazi kroz četkicu kod *C* opet na tu ploču, tako da ploča kod *D* dobiva pozitivan naboj, kod *C* negativan. Tako se isto stražnja ploča pokriva nabojem, što se influencira u stražnjem poprijećnom vodiču *EF* utjecajem naboja prednje ploče.

Želimo li, da jake iskre preskakuju među konduktorima, treba svakom konduktoru pripojiti po jednu lajdensku bocu i izvanje obloge tih boca jedan s drugim spojiti. Onda će napetost narasti do vrijednosti, koja treba za iskru, tekar kada bude mnogo elektriciteta sabrano. Što brže se ploče vrte, to brže se nabijaju konduktori i slijed je iskara brži. Broj se iskara dade i tako povećati, da se nekoliko strojeva združi. — Ako su konduktori odviše razmaknuti, ne će biti iskara, jer napetost između konduktora ne može premašiti određene vrijednosti; najdulja iskra duljinom znatno zaostaje za promjerom ploče (zašto?). Najveće napetosti dosežu 100000 i više volta. — Ako lajdenske boce nisu pripojene konduktorima, a negativni konduktor ima oblik ploče okomite na smjer iskrišta, vidi se u tmici kod jakih strojeva lijep pojav svjetlosti između konduktora: s pozitivnoga konduktora izlazi kratak štap svjetlosti, koji se razgranjuje, pa mu nebrojene grančice sežu do negativnoga konduktora.

Za dobivanje velikih napetosti (do 5 miljuna volta), kakve trebaju kod istraživanja atomskih jezgara, grade se elektrostatski generatori na ovaj način (van de Graaff 1931.). U šupljinu velikog konduktora K (sl. 191.; isp. veličinu čovjeka!) dovodi se kroz otvor sveđer novi elektricitet i to na vrpci-izolatoru PP; taj se elektricitet predaje konduktoru iznutra. Konduktor počiva na zgodnu izolatoru, na pr. valjku JJ. Vrpca je od svile ili papira; krajevi su joj među sobom spojeni, tako da vrpca nema kraja. Ona je primjereno napeta preko dva horizontalna valjka-vodiča U i V, od kojih je jedan duboko ispod konduktora, drugi u konduktoru samom. Donji je valjak žicom spojen sa zemljom Z, gornji s konduktorom. Donji se valjak vrti motorom, tako da se vrti i gornji i vrpca putuje što većom brzinom (na pr. 20 m/sek). Dio vrpce, koji se penje, nabija se dolje elektricitetom i to iz dinamostroja ili ispravljača „malene" napetosti (na pr. 10 kilovolta). Jedan pol stroja na pr. negativni neka je spojen sa zemljom, od drugoga neka ide vod do horizontalnog češlja A (zapravo: horizontalne tanke žice, usporedne sa vrpcom), iz kojega elektricitet pršti na vrpcu. Da se električno polje upravi prema vrpci, nalazi se nasuprot češlju iza vrpce limena ploča L, koja je spojena sa zemljom. Svaki cm² vrpce, kada prođe između A i L, nabije se pozitivnim elektricitetom i taj elektricitet putuje s vrpcom u konduktor. Tamo ga „usiše" češalj B, koji je žicom spojen sa konduktorom. Konduktor se tako neprestance nabija (+)-elektricitetom, t. j. negativni elektricitet (elektroni) neprestance izlazi iz konduktora i češlja B na vrpcu. Prema tome silazeći dio vrpce je (—)-električan.



Sl. 191.

Zad. 134. Otkuda potječe energija električnih naboja na konduktorima Wimshurstova stroja?

171. Raznovrsni električni pokusi. Mehanički učinci. Ako se jedan konduktor električnoga stroja spoji sa zemljom, a na drugi učvrsti kovni šiljak, može se rukom oćutjeti, da od šiljka — kad stroj radi — izilazi „električni vjetar" (Franklin 1747.). Ioni odbijeni od šiljka potežu sa sobom i ostali uzduh, te struja uzduha može čak i svijeću utrnuti. Šiljak se pri tome nastoji pomicati u protivnom smjeru; to se razabira kod „električnoga kola" (Wilson 1750.), aparata, koji podsjeća na reakcijono kolo (§ 85.). Ploča od izolatora lako se stavi u vrtnju, ako sa šiljaka koso postavljenih puštamo na nju električni vjetar. — Ima strojeva na influenciju, koji se vrte kao motori, ako im konduktore sastavimo s konduktorima drugoga stroja, koji daje elektricitet (Holtzov pojav). — Ako se komad

kartona stavi nesimetrično među dva šiljka, od kojih je svaki u svezi s jednim konduktorom električnoga stroja, iskra probije karton i to bliže negativnom konduktoru (Lullin 1766.). Jaka iskra može probiti i staklo.

U tvornicama se plinovi čiste od raznovrsne prašine tako, da ih puštaju kroz vertikalne cijevi, kojih osi zapremaju vertikalne žice nabite elektricitetom visoke napetosti. Elektricitet izlazeći iz žice tjera prašinu k stijenama cijevi; tu se ona sabire i najposlije u krupnijim množinama spadne. (Cottrell, oko 1910.).

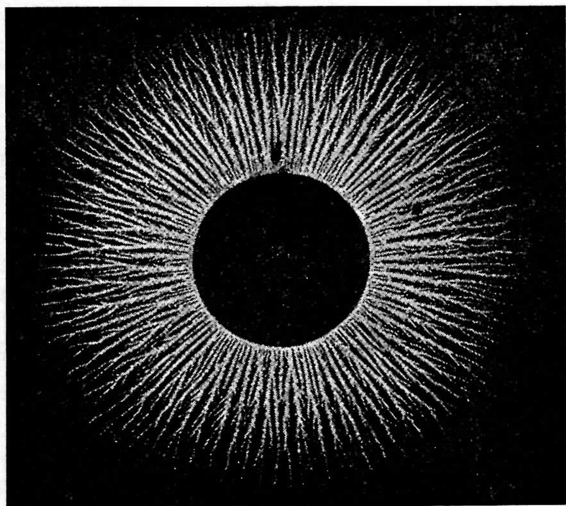
Toplinski i kemijski učinci. Ugrijevanje vodiča, kroz koji se izbije lajdenska baterija, pokazuje se ovim pokusom. Malen je drven mužar začepljen utisnutom drvenom kuglicom; kad u mužaru preskoči iskra, kuglica visoko odskoči, jer se uzduh naglo rastegne (Kinnersley 1761.). — Iskra upaljuje eter (Ludolff 1744.), barut, svijeću netom je utrnula, rasvjetni plin i t. d. — „Električni top" je aparatić, u kojemu puštamo da slaba iskra preskoči kroz eksplozivan plin (na pr. smjesa uzduha i rasvjetnoga plina) zatvoren čepom: čep izleti uz jak prasak. — Ako iskre dulje vremena preskakuju kroz zatvorenu množinu uzduha, obujam se plina umanji i nastane dušična kiselina (Cavendish 1784.). — U blizini električnoga stroja često osjećamo jak miris; da je to od ozona, preinačenoga kisika, pokazao je Schönbein (1840.).

Učinci svjetlosti. Ako u tmici njišemo živu barometra, opažamo u Torricellijevu prostoru svjetlucanje; pokazalo se (Hawksbee 1705.), da je ta svjetlost u svezi s elektricitetom, što nastaje trenjem žive i stakla. — Geisslerove cijevi (v. kasnije).

Lichtenbergove slike. Ako kolač elektrofora dotaknemo izoliranim šiljkom ili pločicom od vodiča, i pustimo iz nabite lajdenske boce iskre na taj vodič, površina se kolača osobitim načinom elektrizira. To se vidi, ako šiljak uklonimo i kolač pospemo zgodnim praškom, na pr. smjesom minija Pb_3O_4 i sumpornoga cvijeta, koji sijani kroz vuneno sito postanu jedan pozitivno drugi negativno električan. Ako je naboj boce bio pozitivan, prione sumpor uz elektrizirana mjesta ploče i tvori razgranjenu sliku; drukčije izgledaju slike kod negativnog naboja (Lichtenberg 1777.). — Ako se fotografska ploča u tamnoj izbi (kod crvene rasvjete) položi na limen tanjur tako, da joj je osjetljivi sloj odozgo, pa ako se s lajdenske boce pusti iskra na ploču, ploča će razvijena običnim fotografskim postupkom pokazati Lichtenbergove slike (sl. 192.).

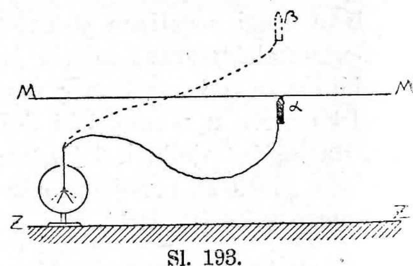
Fiziološki pojavi. Ako se lajdenska boca izbije kroz niz ljudi, što se uhvatiše ruku o ruku, svaki će osjetiti udarac. Udarci ribe drhtulje (torpedo) električni su udarci, pa se i ta riba može poput lajdenske boce izbijati kroz niz ljudi (Heron, 1. vijek posl. Kr.); još su jači udarci ribe gymnotus.

172. Elektricitet uzduha. Kada otkriše električnu iskru, porodila se slutnja, da je m u n j a električna iskra u velikom. Da je tako, utvrdio je (opasnim) opažanjima osobito F r a n k l i n (1752.). Šiljak učvršćen na „zmaju" privezanu užetom (mokrim od kiše) ili šiljak na visokom željeznom štapu „sisao" je elektricitet iz oblaka, kad se bližila oluja; na donjem kraju vôda dobivale su se električne iskre, u pogon se stavljalo „elektrostatsko zvonce", iskrom se upaljivao eter i našlo se, da elektricitet oblaka može biti pozitivan ili negativan. Na ta se otkrića nadovezao izum m u n j o v o d a (F r a n k l i n 1753., D i v i š 1754.), uredbe, kojoj je zadaća, da bez štete odvede elektricitet iz uzduha u Zemlju; munjovod treba da svagdje ima dostatan prorez, da se ne bi velikom toplinom, što je strijela izvodi, rastalio; inače ne treba pretjerivati zahtjeve u izvedbi munjovoda, jer i munjovod, koji baš nije „savršeno" izveden, može služiti svrsi.



Sl. 192.

Elektricitet uzduha može se opažati i za lijepa vremena. Taj se pojav objašnjava, ako uzmemo, da je površina Zemlje *ZZ* električna (sl. 193.). Ako u točku α uzduha stavimo šiljak izolirana vodiča, a vodič je u svezi s listićima elektrometra, kojemu kućica stoji na Zemlji, vodič će primiti potencijal, što ga ima uzduh kod šiljka (§ 169.), a to je potencijal plohe nivoa *MM*. Elektrometar onda pokazuje razliku potencijala plohe nivoa *MM* i potencijala površine zemaljske. Digne li se šiljak vertikalno iznad α do točke β, razmak će listića narasti, jer se razlika potencijala šiljka i Zemlje povećala.



Sl. 193.

Bez upletanja pojma potencijala može se taj pojav ovako razumjeti. Blizu Zemlje električno je polje svagdje jednako jako. Polje izvodi u šiljku influenciju; influencirani elektricitet, koji je protivan zemaljskomu, dotle teče u elektrometar, dok se kod šiljka ne uništi djelovanje polja zemaljskoga, jer na šiljku treba da je jakost polja = 0. Što se više šiljak digne, to više se naboja u elektrometru mora sabrati, da njegovo djelovanje uništi na šiljku djelovanje zemaljskoga naboja.

Ako se prekine sveza šiljka i elektrometra, naboj je elektrometra obično pozitivan; odatle bi slijedilo, da je površina Zemlje obično negativno nabita.

Izmjerivši napetost između šiljka i Zemlje $V_\alpha - V_z$ ili $V_\beta - V_z$ dobivamo odbidbom $(V_\alpha - V_z) - (V_\beta - V_z) = V_\alpha - V_\beta$ t. j. razliku potencijala točaka α i β. Prema formuli $(V_\alpha - V_\beta) : \alpha\beta = E$ (§ 161.) izračunava se onda jakost električnoga polja u uzduhu. Razlika potencijala dviju točaka, kojima je vertikalni razmak 1 m, zove se „p a d p o t e n c i j a l a". Pad se potencijala mijenja u širokim granicama, zimi je poprijeko mnogo veći negoli ljeti. Kao neka srednja vrijednost može se uzeti 150 volt/metar (čitaj „volt po metru"). Budući da je 1 volt $= {}^1/_{300}$ el.-st. c-g-s-jed., a 1m = 100 cm, izlazi prema gornjoj formuli jakost polja $E = 150 \cdot {}^1/_{300} : 100 = 0{\cdot}005$ el.-st. c-g-s-jed.

Kad bi u isti čas nad cijelom Zemljom vladalo jednako jako električno polje, trebalo bi uzeti, da je naboj Zemlje e el.-st. c-g-s-jed. jednako razvrstan na površini, a veličina bi naboja slijedila iz formule $-e/\rho^2 = 0{\cdot}005$, gdje je polumjer Zemlje $\rho = 4 \cdot 10^9 : 2\,\pi$ cm. Dobiva se $e = -2 \cdot 10^{15}$ el.-st. c-g-s-jed. $= -7 \cdot 10^5$ kulona.

Budući da nema savršeno oštroga šiljka, elektrometar ne će valjano pokazivati tražene napetosti. Zato se umjesto šiljka uzimlju bolja pomagala, poglavito plamen svijeće (isp. § 147.), koji je žicom spojen s elektrometrom (B e n n e t 1782.).

Ako se udaljujemo od jednoliko nabite kugle, jakost se polja postepeno umanjuje. No kad bi kod Zemlje samo površina bila elektrizirana, jakost bi polja tekar u visini od kojih 30 km spala za 1% vrijednosti, što je ima blizu površine (isp. zad. 126.). No opažanja (u zrakoplovu) pokazuju, da se pad potencijala brže umanjuje, te već u visini od 6 km iznosi samo 4—6 volt/metar. Ta se činjenica tumači time, da i uzduh sadrži naboj i to pozitivan. Kod uspinjanja sve deblji pozitivni sloj uzduha djeluje odozdo i uništava djelovanje negativnoga elektriciteta površine zemaljske. — Koliko se može uzduh elektrizirati, pokazuje ovaj u sobi izvedeni pokus (W. T h o m s o n 1859.). Jedan se konduktor električnoga stroja sastavi sa zemljom, drugi s izoliranim plamenom. Ako električni stroj radi koju minutu, prođe kroz plamen toliko elektriciteta u uzduh, da se može još dugo iza toga pokazati. U tu se svrhu kućica elektroskopa drži u ruci, tako da ima isti potencijal kao i stijene sobe; listići neka su sastavljeni s plamenom izolirane svijeće. Ako svijeća gori blizu stijene, listići nisu razmaknuti; što više se udalji svijeća od stijena, to je veća divergencija listića.

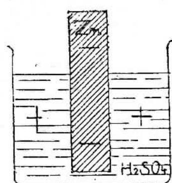
Naboj 1 cm³ uzduha treba pomišljati kao razliku naboja pozitivnih iona i naboja negativnih iona (E l s t e r i G e i t e l 1899.). Sa izoliranoga pozi-

tivnoga nabitoga vodiča naboj se gubi pridolaženjem negativnih iona; naboj negativan uništavaju pozitivni ioni. Važno je dakle za upoznavanje elektriciteta uzduha, da se mjeri brzina, kojom iščezava naboj izoliranoga vodiča. Našlo se, da pretežu naboji pozitivnih iona; i oborine imadu većinom pozitivan naboj.

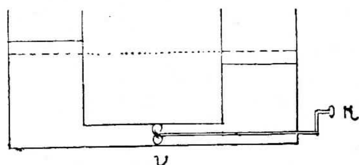
U okolišu vodopada (pa i tamo, gdje se umjetno uzduh mućka s vodom) uzduh je negativno električan. To se može opaziti i na mnogo kilometara daljine. Morski je zrak pod utjecajem rasprskivanja valova slane vode pozitivno električan. (B a l o-e l e k t r i c i t e t, L e n a r d 1892.).

3. Električna struja

173. Voltin pojav. Svojstva električne struje mogla su se pobliže proučiti tek, kad se našao obilniji izvor elektriciteta no što su trenje i influencija. Izdašan se izvor elektriciteta dobiva, ako se r a z l i č i t i vodiči zgodno stave u d o t i c a j. Tiču li se dva vodiča jedan drugoga, nastaje bez izvanje pobude električna napetost među njima; na pr. ako je tutija (cinak, Zn) uronjena u razrijeđenu sumpornu kiselinu, tekućina dobiva veći potencijal, negoli tutija; njezina je napetost prema tutiji pozitivna (sl. 194.). Napetost, što nastaje dotikom dvaju vodiča („V o l t i n p o j a v"), u svakom je primjeru neznatna, te se običnim elektrometrom može samo uz pomoć kondenzatora pokazati (V o l t a 1796., isp. § 165.). Ta napetost stoji samo do vrsti vodiča, a nije zavisna ni o obliku njihovu. Treba dakle imati na umu, da je potencijal na tutiji stalan (isp. § 158.), na pr. V, isto tako u kiselini svagdje isti, na pr. V', dok je na granici tako brz prijelaz od vrijednosti V na V', da govorimo o „s k o k u p o t e n c i j a l a" $V - V'$.



Sl. 194.



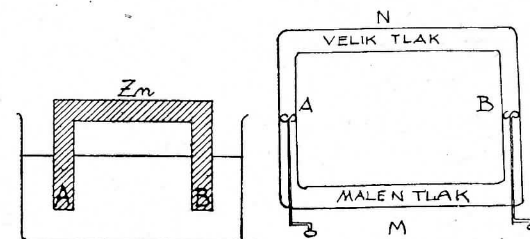
Sl. 195.

Zašto nastaje taj skok potencijala, ne ćemo ispitivati; uzrok njegov zove se „e l e k t r o m o t o r n a s i l a" (t. j. „sila", koja pomakne elektricitet, lat. *moveo, gibljem*). Značenje tih pojmova može se zorno objasniti sličnim pojmovima iz mehanike („m e h a n i č k e a n a l o g i j e"!). U spojenim posudama mirna voda obično stoji jednako visoko (sl. 195.); no kad bismo u horizontalnoj spojnoj cijevi vrtjeli vijak *v* ručkom *r*, razina bi vode u posudama bila nejednaka; u spojnoj bi cijevi sada na jednoj strani vladao veći tlak, na drugoj manji. Razlici tih tlakova odgovara u Voltinu pojavu električna napetost, snazi vijka odgovara elektromotorna sila. — Elektromotorna se sila mjeri napetošću, koja od nje nastaje.

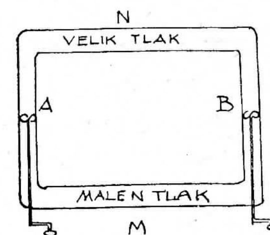
V o l t a je otkrio taj „e l e k t r i c i t e t d o t i k a" nastavljajući fiziološka istraživanja, što ih je izveo G a l v a n i (od 1780. do 1790.). Galvani je ispitivao djelovanje elektriciteta na životinje i motrio trzanje žabljih krakova, kada bi se kroz njih izbio električni stroj ili lajdenska boca, ali gdjekada i b e z t i h i z v o r a elektriciteta. V o l t a je spoznao (1792.), da to ne biva možda od nekoga „životinjskog" elektriciteta, već od izvora dotada nepoznatoga, a životinjski je preparat samo sredstvo za nalaženje toga elektriciteta. Na to su ga mišljenje sklonili osobito njegovi pokusi s okusom. Izoliranom tutijom dotaknem vršak jezika; navlaženom rukom uhvatim srebrnu žlicu i žlicom dotaknem tutiju; oćutjet ću kiseo okus, doklegod se žlica tiče tutije. Budući, da se isto takav okus osjeća, ako se jezikom tiče pozitivni konduktor električnoga stroja, zaključuje Volta, da u opisanom pokusu teče pozitivni elektricitet iz kovine u jezik. Ponovim li pokus, izmijenivši tutiju i srebro, oćutjet ću lužnat okus, kanda jezikom tičem negativno električno tijelo; pozitivni elektricitet struji dakle sada iz jezika u vodič. Kad bi izvor struje bilo naše tijelo, ne bi se moglo razumjeti mijenjanje smjera struje.

U počast Galvaniu nauk se o električnoj struji još i danas gdjekad zove g a l v a n i z a m.

174. Galvanski članak. Da struja elektriciteta, dobivenoga dotikom, bude t r a j n a, trebaju n a j m a n j e t r i v o d i č a (V o l t a 1796.). Ako krajeve A i B (sl. 196.) svinutoga štapa od tutije uronimo u kiselinu, elektromotorna će sila na dotačištu A raditi protiv elektromotorne sile dotačišta B. Kako su te elektromotorne sile jednake, ne će one izvoditi trajne električne struje; elektricitet će se samo toliko pomaći, da potencijal kiseline bude za određenu veličinu veći od potencijala tutije. Sličan je tome mehanički primjer, kad se u horizontalnoj, u okvir svinutoj cijevi vrte dva vijka A i B (sl. 197.) tako, da im se učinci unište, te voda, što je u cijevi, miruje; učinak je vijaka onda samo taj, da je tlak u dijelu cijevi AMB drugi, nego li u dijelu ANB.



Sl. 196.

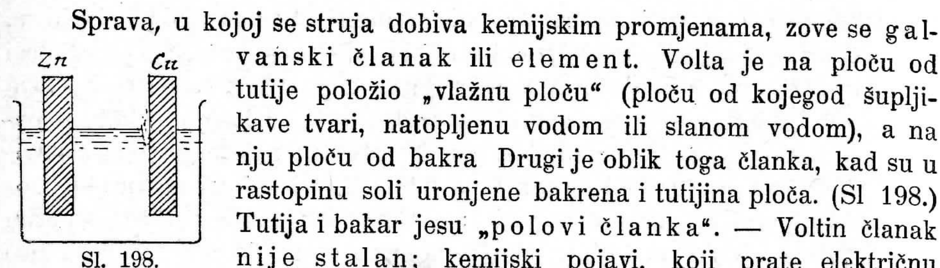


Sl. 197.

Nisu ni k o j a g o d tri vodiča podesna, da daju trajnu struju. Električna struja izvodi rasvjetu, goni strojeve i t. d., ona dakle daje energiju; ta energija, kad struja nastaje dotikom vodiča, potječe od kemijskih promjena; prema tome, ako se sastave vodiči, koji ne djeluju kemijski jedan na drugi, ne će biti ni struje.

Našlo se, da Voltin pojav, što nastaje dotikom dviju kovina, iščezava, ako se kovine suše u razrijeđenu prostoru i time liše vlažne kožice, kojom su na zraku prevučene; onda nema kemijskih procesa, pa nema ni elektromotorne sile.

Sprava, u kojoj se struja dobiva kemijskim promjenama, zove se **g a l v a n s k i č l a n a k** ili **e l e m e n t**. Volta je na ploču od tutije položio „vlažnu ploču" (ploču od kojegod šupljikave tvari, natopljenu vodom ili slanom vodom), a na nju ploču od bakra Drugi je oblik toga članka, kad su u rastopinu soli uronjene bakrena i tutijina ploča. (Sl 198.) Tutija i bakar jesu „**p o l o v i č l a n k a**". — Voltin članak **n i j e s t a l a n**; kemijski pojavi, koji prate električnu struju, tako promijene članak, te nestane elektromotorne sile. Ima članaka, koji kroz dulje vrijeme bez znatne promjene djeluju, pa se zovu „**s t a l n i**".

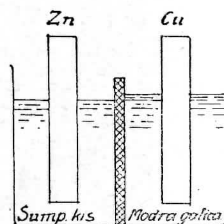


Sl. 198.

Među njima je najstariji D a n i e l l o v (1836.); ima dvije tekućine: koncentrovanu otopinu modre galice i razrijeđenu otopinu sumporne kiseline; tekućine su odijeljene šupljikavom, glinenom stijenom; u galici je ploča od bakra, u kiselini ploča od tutije (sl. 199.) Elektromotorna je sila toga članka od prilike 1·1 volta. — B u n s e n o v članak (1841) s kromovom kiselinom, tutijom i ugljenom ima elektromotornu silu oko 2 volta. — Za pogon kućnih zvona i telefona najviše služi L e c l a n c h é o v (1868.) sa $1^1/_2$ volta; u rastopini nišadora stoje štap od tutije i valjak načinjen stlačivanjem manganova dioksida, ugljena i šelaka; amo idu i t. zv. „suhi članci". — U svima je tima člancima tutija negativni pol. — Da se tutija laganije troši, treba je „amalgamirati".

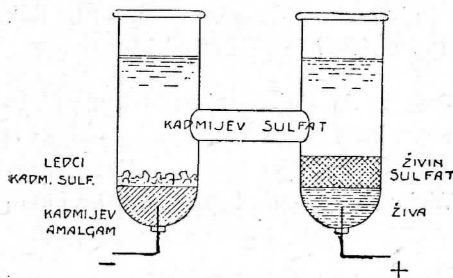
W e s t o n o v članak (1892.) služi kao „**n o r m a l n i č l a n a k**" kod ispoređivanja napetosti; elektromotorna mu je sila kod 20 °C 1·01830 volta, a samo se neznatno mijenja, ako se temperatura promijeni.

Pozitivni mu je pol živa (sl. 200.), nje se tiče pasta načinjena poglavito od živina sulfata Hg_2SO_4, nad ovom je koncentrovana rastopina kadmijeva sulfata $CdSO_4$, a negativni je pol kadmijev amalgam. (Kadmij je kemijski srodan tutiji.)



Sl. 199.

175. Voltin stup ili baterija. Volta je pokazao (1799.), kako se sastavljanjem više članaka mogu dobiti veće električne napetosti. Pozitivni se pol prvoga članka sastavi žicom s negativnim polom drugoga, pozitivni pol drugoga s negativnim polom trećega i t. d., kako je već prije razloženo (§ 159.). Sprava sastavljena od više članaka zove se „**g a l v a n s k a b a t e r i j a**"; mjesta, s kojih vodimo struju napolje, zovu se **p o l o v i b a t e r i j e**; napetost između polova zove se **n a p e t o s t b a t e r i j e**. Prva baterija imala je oblik **s t u p a**, koji se sagradio na taj način, da su se članci sastavljeni od ploča stavljali jedan na drugi. — „**S u h i s t u p**" (B e h r e n s 1806.) sadrži na stotine ili tisuće pločica od „zlatnoga"



Sl. 200.

(pobakrenoga) papira sastavljenih s jednako mnogo pločica od „srebrnoga" (pokositrenoga) papira; slojevi slijede ovako: bakar-papir-kositer-bakar-papir-kositer-bakar- . . . .; napetost između polova stupa iznosi mnogo stotina i više volta. Ako se dobrom izolacijom spriječi mnogo prelaženje struje, napetost se suhoga stupa dugo uzdrži.

Zad. **135.** Kolika je napetost džepne baterije sastavljene od 3 Leclanchéova članka?

176. Jakost struje. **J a k o s t j e e l e k t r i č n e s t r u j e** veličina nalik jakosti struje vode. Ako ispod mosta rijeke proteče u 1 sek 100 tona vode, kažemo, da je jakost struje vode 100 tona/sek (čitaj: tona u sekundi!). U 5 sek proteći će 100 · 5 = 500 tona. Između jakosti struje i, vremena t i množine e postoji dakle sveza:

$$i \cdot t = e.$$

Ako u 1 sek prođe 1 tona, jakost je struje 1 tona/sek.

Isto tako ako kroz poprijeчni prorez vodiča (na pr. žice) prođe u 1 sek množina elektriciteta 1 kulon, struja ima jakost 1 kulon u sekundi, a ta se jakost zove 1 **a m p e r** (praktična jedinica). Ako u 1 sek proteče 1 el.-st. c-g-s—jed. elektriciteta, struja ima jakost 1 el.-st. c-g-s—jed.; ako u 1 sek proteče 1 el.-magn. c-g-s—jed. elektriciteta, jakost je struje 1 el.-magn. c-g-s—jed. Prema tome oni omjeri, što postoje među jedinicama množine elektriciteta (§ 155.), postoje i među jedinicama jakosti, te je

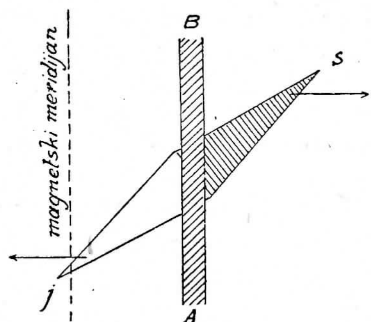
$$1 \; amper = 0{\cdot}1 \; el.\text{-}magn. \; c\text{-}g\text{-}s\text{—}jed. = 3 \cdot 10^9 \; el.\text{-}st. \; c\text{-}g\text{-}s\text{—}jed.$$

Budući da električnu struju drugim načinom zapažamo negoli struju vode, bit će i izmjerivanje tih struja uopće različito. Jednostavan je ovakav primjer. Ako se elektricitet s nekoga vodiča odvodi, a naboj se ne nadomješta, postaje napetost vodiča sve manja, pa se jakost struje može izračunati iz brzine, kojom pada napetost. Ako se izbija kondenzator, koji ima kapacitet 0·000002 farada, a napetost spadne u 4 sek od 110 volta na 108 volta, umanjio se naboj za 0·000002 × (110—108) = 0·000004 kulona dakle je (prosječna) jakost struje 0·000004 : 4 = 0·000001 ampera (= 1 mikroamper).

Struja vode ne treba da bude svagdje **j e d n a k o** jaka; kad rijeka na nekom mjestu raste, struja je u gornjem toku jača negoli u donjem. Slično vrijedi i za električnu struju, no u prvom nas redu zanimaju primjeri, gdje je struja u svima prorezima jednake jakosti.

Zad. **136.** Baterija kondenzatora s kapacitetom 80 mikrofarada nabita je na 110 volta; ako obloge sastavimo sa vlažnim koncem, napetost za 5 sek spadne na 104 volta; kolika je prosječna jakost struje? [96 mikroampera]

177. Djelovanje električne struje na magnet. Ako se iznad deklinatorne igle *sj* (sl. 201.) razapne u ravnini magnetskoga meridijana odulja žica *AB*, a kroz žicu teče struja iz galvanskoga članka, igla se zakrene, te joj smjer ne leži više u smjeru meridijana (Ørsted 1820.). Zakret igle bit će veći, ako je zemaljsko magnetsko polje oslabljeno pomoćnim magnetom (§ 139.); ako je djelovanje zemaljskoga polja sasvim uništeno, igla se namješta okomito na meridijan, dakle okomito na smjer električne struje. Struja goni magnetski pol smjerom, koji je okomit na ravninu položenu kroz pol i kroz pravac struje. Promijeni li se smjer struje, da bude protivan, okrene se i sila, kojom struja djeluje na magnetski pol, u protivni smjer. Koji je smjer te sile, kaže Ampèreovo pravilo (1820.):



Sl. 201.

Pomislimo (sitnog) plivača, koji pliva smjerom struje pozitivnoga elektriciteta, a gleda magnetski pol; struja goni *sje-ver-ni* pol plivaču na *li-je-vo*, *ju-žni* na *de-sno*.

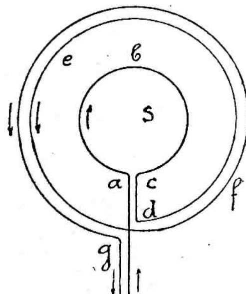
Pri tome pomišljamo, da je električna struja sastavljena od struje pozitivnoga elektriciteta i struje negativnoga elektriciteta, koje idu jedna protiv druge; radi kratkoće se onda umjesto „smjer struje pozitivnoga elektriciteta“ govori naprosto „smjer struje“, te je u tom smislu smjer struje negativnoga elektriciteta „smjeru struje“ protivan. (Danas držimo, da je električna struja u bakrenoj žici samo struja negativnoga elektriciteta; smjerom struje označujemo dakle u tom primjeru smjer, koji je pravom smjeru struje protivan!)

Zad. **137.** Koji je smjer struje u primjeru sl. 201.?

Zad. **138.** Kroz tramvajski motor teče struja poradi napetosti između gornjega voda i tračnica; na pruzi, koja ide od sjevera prama jugu, u blizini krajnje južne stanice sjeverni se pol busole položene na tračnicu otklanja prema istoku; koji predznak ima naboj gornjega voda?

Veličina sile, kojom struja djeluje na magnetski pol, vlada se po zakonu, koji nađoše Biot i Savart (1820.). Ovdje će se iznijeti samo najznatnije o toj sili.

Struja djeluje na magnetski pol silom, koja je razmjerna jakosti struje i razmjerna množini magnetizma. Ako se jakost struje podvostruči, naraste na dvostruko i sila, kojom struja djeluje na magnetski pol. — Ta je sila zavisna i o obliku vodiča, o veličini njegovoj, pa i o namještaju magnetskoga pola. U važnom primjeru, da struja teče vodičem svinutim u krug, a magnetski je pol u središtu, sila je obrnuto razmjerna polumjeru kruga. Pokusom može se ta



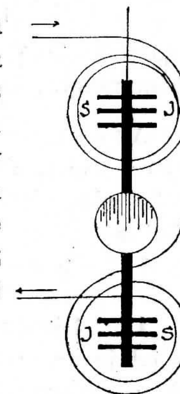
Sl. 202.

tvrdnja ovako potkrijepiti. Struja se vodi obodnicom kruga *abc* (sl. 202.) a onda protivnim smjerom kroz dva kružna uzvoja *defg*, koji imadu polumjer 2 puta veći negoli krug *abc*. Pokus pokazuje, da struja, koja teče kroz ta tri kruga, ne djeluje na magnetni pol *S*, koji je u središtu; struja u oba veća uzvoja uništava dakle djelovanje struje u manjemu uzvoju, pa je prema tome djelovanje struje u jednom od većih uzvoja jednako polovici djelovanja struje u manjemu uzvoju.

Ako struja teče kružnom žicom polumjera 1 cm (obodnica $= 2\pi$ cm), a djeluje na magnetski pol 1 (§ 136.) u središtu silom 2π dina, velimo, da je jakost struje 1 elektromagnetska c-g-s—jed. Tom se odredbom električke mjere nadovezuju na magnetske (Weber 1856.). Prema tome ako struja jakosti i el.-magn. c-g-s—jed. teče krugom, kojemu je polumjer r cm, djelovat će na pol μ el.-magn. c-g-s—jed., koji je u središtu, sa silom

$$p = 2\pi i \mu / r \text{ dina.}$$

178. Galvanometar. Ako je žica, kojom teče električna struja, svinuta u okvir, koji u neznatnoj daljini okružuje deklinatornu iglu, a namješten je u magnetski meridijan, učinci će se pojedinih dijelova okvira na iglu podupirati; još jači se učinak dobije, ako se okvir pomnogostruči t. j. ako se žica po više puta vodi oko igle. Ako igla, koju struja okružuje, pripada astatskom paru (§ 139.), utjecaj će se struje na iglu pogotovu znatno očitovati, jer je onda utjecaj Zemlje neznatan. Sprave tako dobivene zovu se galvanoskopi i služe tome, da se vidi, teče li električna („galvanska“) struja. Ako takva sprava ima i uredbu za mjerenje, zove se galvanometar. Ako je igla okvirom od žice sakrivena ili ako je prekratka, u čvrstoj je svezi s njome laka kazaljka, koja igrajući pred ljestvicom pokazuje, kolik je zakret igle. Kod osjetljivih se galvanometara umjesto tvarne kazaljke upotrebljava zraka svjetlosti, koja se odbija od sitnoga zrcala, što je s magnetnom iglom galvanometra u čvrstoj svezi; zakrene li se igla, zakrene se i zrcalo, a s time i zraka svjetlosti, što se od zrcala odbija. Ta kazaljka nema težine, pa može biti dugačka. Osobito je osjetljiv galvanometar W. Thomsona (1858.), koji je građen prema sl. 203.; astatički sustav ima ovdje umjesto dvije magnetne igle dvije skupine kratkih igala (kao kod kompasa!); laki vertikalni štap nosi obje skupine igala i zrcalo, a visi na vrlo nježnoj niti; struja se redom vodi oko svake skupine igala tako, da se učinci podupiru.

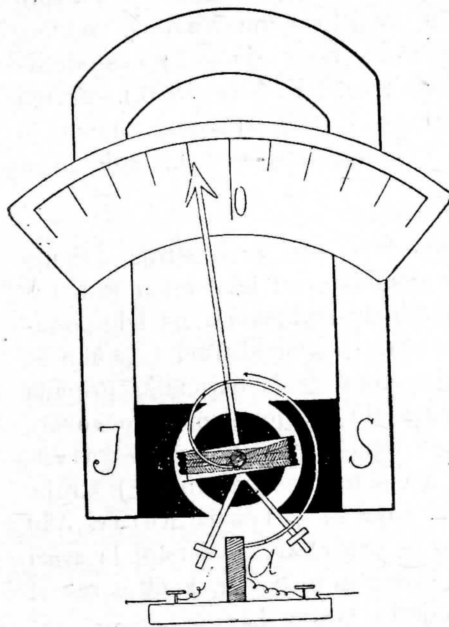


Sl. 203.

Električne struje dobivene trenjem ili influencijom poprijeko su kud i kamo slabije negoli struje iz članka, te se mogu pokazati samo osjetljivim galvanometrima. To je u prvi mah

čudno, jer se kod električnoga stroja mogu dobiti napetosti mnogo tisuća puta veće od napetosti članka. No te velike napetosti nastaju samo onda, ako konduktori električnoga stroja nisu spojeni vodičem, te elektricitet nema prilike da otječe.

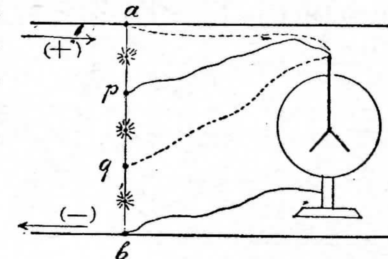
179. Ampermetar. U galvanometrima, koje smo opisali, struja djeluje na pomične magnete. Mnogo se više upotrebljavaju galvanometri „s pokretnim okvirom"; u njima magnetsko polje djeluje na pomičan okvir, oko kojega teče struja. (O tom djelovanju isp. kasnije.) Osnovna je misao tih sprava prikazana u sl. 204.; okvir se nalazi u tijesnom prostoru između valjkovito izdubenih polnih nastavaka potkovastog magneta i željezne jezgre (nastavci i jezgra u slici su crni); u položaju ravnoteže drži se okvir sa dva elastična pera, koja služe i dovođenju struje (u slici prikazano je samo prednje pero, koje je učvršćeno kod *a*). Što je jača struja, to jače će magnetsko polje djelovati na okvir, pa će i zakret okvira biti veći. (Deprez, d' Arsonval 1881.) Prednost je tih galvanometara, što im ne smetaju tuđa magnetska polja; jakost je polja samog galvanometra tolika, da se ovdje ne trebamo obazirati na polje zemaljsko ili na polja od jakih struja električnih središnjica, koja svojom nestalnošću smetaju ili onemogućuju upotrebu galvanometara, koji imadu pomične magnete.



Sl. 204.

Ako se kazaljka galvanometra nalazi ispred ljestvice razdijeljene na ampere, galvanometar se zove ampermetar. Ljestvica je ampermetra s pokretnim okvirom jednolična, to će reći, da je razmak između dva susjedna poteza ljestvice svagdje jednak: dvostrukoj struji pripada dvostruki pokret kazaljke.

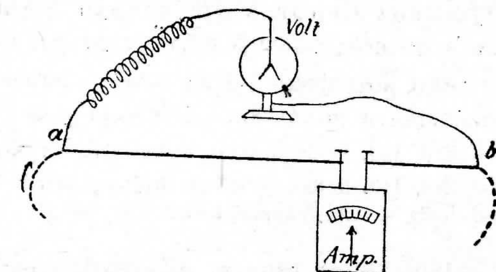
180. Struja i napetost. Ako vodičem ne teče električna struja, potencijal je na vodiču stalan (§ 158.); kad žicom teče struja, opada potencijal u smjeru struje slično, kako opada tlak vode, kad voda struji horizontalnom cijevi (§ 83.). O tome se možemo uvjeriti, ako iz vodova električne središnjice pustimo struju kroz niz žarulja iste vrsti. Točku *b* jednoga voda (sl. 205.) sastavimo sa kućicom elektrometra, a listiće njegove s točkom *a* drugoga voda ili sa točkama *p* i *q* na žicama, što spajaju žarulje. Potencijali tih točaka neka su redom V_b, V_a, V_p, V_q. Ako je napetost između vodova $V_a - V_b = 120$ volta, onda je u nacrtanom primjeru (3 žarulje!) $V_b - V_p = 80$ volta, $V_q - V_b = 40$ volta. Točnije se može pokazati, da potencijal u žici (stalnoga proreza), kojom teče struja, opada po zakonu pravca t. j. po zakonu, koji vrijedi i za tlak vode u spomenutom mehaničkom primjeru.



Sl 205.

181. Ohmov zakon, I. Za nauku je i za praksu važno, da umijemo unaprijed, bez mjerenja, na osnovu zgodnih podataka izračunati jakost struje. Ta se zadaća rješava primjenom zakona, što ga je našao Ohm (1826.). Upoznat ćemo se s tim zakonom postepeno.

Kroz žicu *ab* (sl. 206.) neka teče električna struja; struja unilazi kod *a*, izlazi kod *b*. U žicu uklopljen je ampermetar. Ne obazirući se na posljednji uzrok struje reći ćemo: struja teče žicom *ab*, jer je tjera električna napetost, što vlada između točaka *a* i *b*. (Tako isto struju vode goni razlika tlakova ili mehanička napetost.) Električna se napetost mjeri elektrometrom (v. sl.!). Ako se udesi, da struja bude jača, elektrometar će pokazivati, da je i napetost narasla. Ohmov zakon veli, da je **jakost struje razmjerna s napetošću**; na pr. ako elektrometar pokazuje 50 volta, ampermetar 3 ampera, izaći će kod napetosti 100 volta jakost struje 6 ampera.



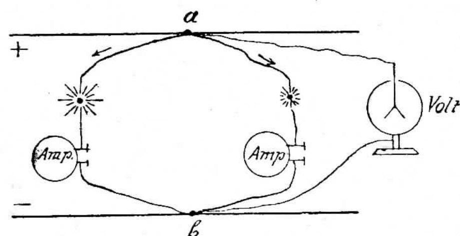
Sl. 206.

Treba međutim imati na umu, da to vrijedi samo onda, ako ne mijenjamo vodiča *ab*; treba nastojati, da se ne bi ni svojstva vodiča strujom promijenila, poimence da ne bi temperatura njegova zbog struje porasla.

Na svakoj je električnoj žarulji zabilježeno, za koju je napetost određena; kada između krajeva žice žarulje vlada propisana napetost, ide kroz žarulju struja kakva treba; ako se žarulja određena za 110 volta napetosti nadoveže na vodove od 220 volta, nastaje prejaka struja i žarulja se uništi.

Koliku će struju određena napetost slati u vodič, stoji još i do vodiča. Od točke *a* električnoga voda (sl. 207.) neka idu dvije grane struje prema

točki b drugoga voda; u jednoj neka je žarulja slabijega sjaja, u drugoj jača žarulja. Jakost je struje u svakoj grani druga, premda svaka grana stoji pod istom napetošću $V_a - V_b$. Za onu granu, u kojoj je struja jača, kažemo, da „ima malen otpor", dok grana slabe struje ima veliki otpor. Pojam se električnoga otpora određuje Ohmovim zakonom, koji kaže još i to, da je **jakost struje obrnuto razmjerna s otporom.** Teče li u primjeru sl. 207. kroz lijevu granu struja 2 puta jača od struje desne grane, otpor je lijeve grane $1/_2$ otpora desne. Ako se otpor bilježi sa r, jakost struje sa i, obje su tvrdnje Ohmova zakona izražene jednadžbom



Sl. 207.

$$i = k \cdot (V_a - V_b) : r,$$

gdje je k konstanta razmjernosti. Jedinica se otpora tako odabira, da bude $k = 1$, dakle

$$i = (V_a - V_b) : r.$$

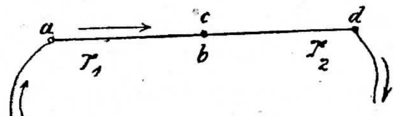
U praktičnom je sustavu mjera jedinica otpora 1 om; napetost 1 volt šalje kroz otpor 1 om struju 1 amper; dakle na pr. napetost 20 volta šalje kroz otpor 5 oma struju $20 : 5 = 4$ ampera.

Ako poznajemo jakost struje i napetost među krajevima vodiča, otpor se izračunava prema formuli $r = (V_a - V_b) : i$.

Zad. **139.** Kolik je otpor, u koji napetost 220 volta šalje struju 0·4 ampera?

Zad. **140.** Kolika je jakost struje, ako kroz žicu s otporom 500 oma pustimo struju s napetošću 2 volta (akumulator!)?

182. Zakon otpora. Ako vodič ab (sl. 208.) otpora r_1 sastavimo s vodičem cd otpora r_2, spojivši krajeve b i c, dobivamo vodič ad, kojemu je otpor jednak zbroju otpora danih vodiča. To izlazi primjenom Ohmova zakona. Neka su V_a, V_b, V_d potencijali u točkama a, b, d. Teče li struja redom kroz dva vodiča, ona je u oba vodiča jednaka; dakle je



Sl. 208.

$$i = (V_a - V_b) : r_1 = (V_b - V_d) : r_2,$$

a odatle prema poznatom poučku aritmetike slijedi

$$i = (V_a - V_b + V_b - V_d) : (r_1 + r_2) = (V_a - V_d) : (r_1 + r_2).$$

Kako brojnik potonjega razlomka znači napetost među krajevima vodiča ad, nazivnik $r_1 + r_2$ znači otpor njegov.

Ako su ab i cd dva sasvim jednaka komada žice, žica ad ima otpor 2 puta veći, negoli žica ab. Žica dvostruke dužine imade dakle dvostruk otpor; otpor žice razmjeran je dužini njezinoj.

Što je veći prorez žice, to joj je manji otpor; iskustvo pokazuje, da su otpori jednako dugačkih žica, načinjenih od iste tvari, obrnuto razmjerni s površinom proreza žica.

Ako je dužina žice l cm, prorez ω cm², ti su zakoni otpora izraženi jednadžbom

$$r = \sigma\, l / \omega;$$

konstanta razmjernosti σ zavisi o tvari žice, pa se zove specifični otpor. Specifični je otpor u željeza od prilike 6 puta veći negoli u bakra, u žive 10 puta veći negoli u željeza. Kod električnih središnjica stalo je do toga, da napetost između obiju žica, što idu k trošiocima struje, bude u cijeloj „mreži" koliko je moguće jednaka. Sasvim se ne može udovoljiti tome zahtjevu, jer potencijal duž struje opada. No prema Ohmovu zakonu $V_a - V_b = i \cdot r$ izlazi, da je ovo opadanje potencijala to manje, što je manji otpor dovodnih žica; treba dakle dovodne žice uzeti od tvari s malenim specifičnim otporom, a prorez žica treba da je velik.

„Om" je jedinica u elektromagnetskom praktičnom sustavu mjera, pa mu se značenje određuje uz obzir na druge jedinice toga sustava. Da se ukloni ta strampútica u definicijama, određen je međunarodni om: to je otpor, što ga ima kod 0°C stup žive dug 106·3 cm, a sadržan u cijevi s unutarnjim prorezom 1 mm². Određujući međunarodni om nastojahu, da bude u što boljem skladu s elektromagnetskim omom. Međunarodni je om i u nas u „javnom prometu" zakonom propisana mjera otpora. Uostalom se kasnije našlo, da je međunarodni om za $1/_2$ ‰ veći od elektromagnetskoga oma. — Skraćena oznaka oma jest: Ω (grč. veliko slovo za dugi glas o).

Zad. **141.** Kolik je specifični otpor žive kod 0 °C? [0·0000 9408 om, cm]

Zad. **142.** Specifični je otpor željeza kod 0 °C 0·0000097 om, cm; kolik otpor ima željezna šipka proreza 1 cm², a dužine 1 km? [0·97 oma]

183. Neke primjene Ohmova zakona. Kad se uklapa ampermetar u tok struje, obično nam je stalo do toga, da se ne bi time znatno promijenila jakost struje, što je želimo mjeriti; žice ampermetra treba dakle da imadu neznatan otpor.

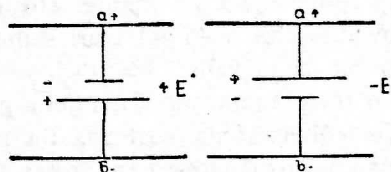
Što je jača struja u spravi za mjerenje jakosti struje, to veća napetost vlada između „stezaljaka" sprave (stezaljke su ona mjesta električne sprave, gdje se pričvrste izvanje žice). Ako se na ljestvici sprave umjesto jakosti struje zabilježe napetosti, sprava može služiti mjerenju napetosti. Tako se dobivaju voltmetri, koji su u glavnome građeni kao i ampermetri, a od „elektrostatskih" se voltmetara razlikuju time, što kroz njih teče struja,

dok u elektrostatskima naboji miruju. Ako u primjeru sl. 205. zamislimo elektrostatski voltmetar nadomješten voltmetrom, kroz koji teče struja, razabiramo, da takav voltmetar mora imati velik otpor, da se ne bi nadovezanjem voltmetra porodila u grani njegovoj jaka struja.

Kad nam je dan izvor elektriciteta, možemo struju pojačati ili oslabiti, ako otpor umanjimo ili povećamo. Otpor povećavamo, ako krug struje produžimo uklopivši u nj još koji vodič. Zgodnom mijenjanju otpora služe otpornici ili reostati (ῥέω, *tečem*), zbirke vodiča različitih otpora.

Ako se vodiči različitih potencijala spoje vodičem vrlo malenog otpora, kažemo, da se dogodio „kratak spoj“ (jer kratke žice imadu malen otpor); ako zbog kratkog spoja struja preko mjere naraste, mogu nastati štete i nesreće.

184. Ohmov zakon, II. Neka je a pozitivni pol nekog izvora struje, b negativni pol (sl. 209.), $V_a - V_b$ napetost među polovima. Uklopimo među polove galvanski članak s elektromotornom silom E. (U slici je članak prikazan uobičajenim načinom, t. j. sa dvije usporedne crte nejednake dužine.) Jakost je struje



Sl. 209.

$$i = (V_a - V_b \pm E) : r,$$

gdje je r otpor vodiča između polova a i b. Predznak „+“ ispred E treba uzeti, kada se oba izvora struje podupiru (lijevi dio crtnje); predznak „—“, kada se slabe (desni dio crtnje).

Ako iz voda sa 110 volta napetosti nabijamo bateriju od 30 akumulatora, svaki od 2 volta elektromotorne sile, brojnik je u razlomku predašnje formule $110 - 30 \cdot 2 = 50$ volta. Ako se ti isti akumulatori tako uklope, da pomažu spomenutoj napetosti, brojnik je našeg razlomka $110 + 30 \cdot 2 = 170$ volta.

Ako se polovi galvanskoga članka, kojemu je elektromotorna sila E, sastave žicom, jakost se struje dobiva pomišljajući, da se u sl. 209. točke a i b podudaraju. Onda je $V_a = V_b$ dakle.

$$i = E/r,$$

gdje je r otpor čitavoga kruga struje. Taj otpor često rastavljamo u dva pribrojnika: otpor članka ili unutarnji otpor i otpor preostaloga vodiča ili izvanji otpor. Unutarnji otpor stoji do oblika, veličine i vrsti vodiča u članku.

Ako se 10 članaka s elektromotornom silom E volta sastavi redom u bateriju (to j. kako je opisano u § 175.), elektromotorna je sila baterije $10\,E$ volta; ako je otpor svakoga članka r oma, otpor je baterije $10\,r$ oma. r' neka je izvanji otpor. Onda je jakost struje $i = 10\,E : (10\,r + r')$. — Ako

je izvanji otpor neznatan prema unutarnjemu, izlazi $i = 10\,E : (10\,r + 0) = E/r$; 10 članaka u tom slučaju ne daje jače struje negoli 1 članak. Ako je unutarnji otpor malen prema izvanjemu, bit će $i = 10\,E : (0 + r') = 10 \cdot E/r'$; to će reći, da 10 članaka daje 10 puta jaču struju negoli 1 članak.

Neka je elektromotorna sila članka E, napetost između polova $V_1 - V_2$, unutarnji otpor r, izvanji r'. Primjenom Ohmova zakona na cijeli krug struje izlazi $i = E : (r + r')$; za sam izvanji otpor dobivamo $i = (V_1 - V_2) : r'$. Isporedbom tih dviju jednadžbi slijedi $V_1 - V_2 = \frac{r'}{r + r'} E$. Dakle je $V_1 - V_2 < E$. Ako je izvanji otpor sasvim neznatan, napetost je polova $V_1 - V_2 = 0$; ako je izvanji otpor silno velik, onda je $V_1 - V_2 = E$. Prema tome je napetost polova jednaka elektromotornoj sili, kad nema struje; inače je napetost polova manja od elektromotorne sile.

Zad. **143.** Bateriju od 30 akumulatora po 2 volta elektromotorne sile treba nabiti strujom iz dinamostroja, koji daje 110 volta napetosti; kolik treba da je sav otpor, da jakost struje bude 5 ampera? [10 oma]

Zas. **144.** Kolika je jakost struje, što je daje Daniellov članak s elektromotornom silom 1·1 volta i 0·2 oma unutarnjega otpora, ako su mu polovi na kratko spojeni?

Zad **145.** Iz baterije od 6 članaka, svaki sa 1·9 volta i 0·3 oma teče struja kroz izvanji otpor 1·2 oma; kolika je jakost struje? [3·8 ampera]

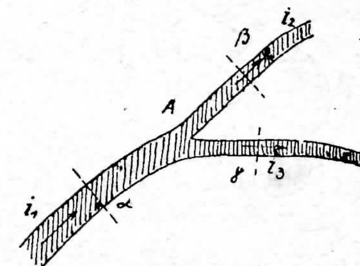
Zad. **146.** Kroz otpor 1000 oma teče struja iz akumulatora, kojemu je elektromotorna sila 2 volta, a otpor neznatan; kolika je jakost struje? kolika, ako upotrebimo bateriju od 4 akumulatora?

Zad. **147.** Akumulator s elektromotornom silom 2·1 volta nabija se baterijom od dva akumulatora, kojih svaki ima 2·0 volta; kolika je jakost struje, ako svaki akumulator ima otpor 0·10 oma, a otpori su žica neznatni? [6·3 ampera]

185. Razgranjivanje struje. Ako se struja jakosti i_1 na nekom mjestu A (sl. 210.) rastavi u dvije grane, a jakosti su u granama i_2 i i_3, vrijedi Kirchhoffov zakon (1847.):

$$i_1 = i_2 + i_3.$$

Da je taj zakon valjan, razumije se samo sobom, ako je električna „struja“ doista tok elektriciteta: koliko u 1 sek pritječe elektriciteta k razgraništu kroz prorez α nerazgranjene struje, toliko treba da i otječe kroz proreze β i γ obiju grana. Uostalom tko bi električnu struju drukčije sebi zamišljao, može ampermetrom veličine i_1, i_2, i_3 izmjeriti i tako utvrditi, da je Kirchhoffov zakon valjan.

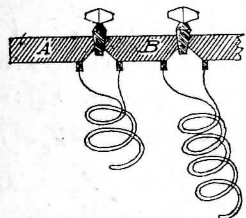


Sl. 210.

Mnogo ima primjera za razgranjivanje struje. Električne središnjice „dijele“ struju prema „sustavu usporednih vodova“. Ulicama, u kojima se troši struja, vode se dvije međusobno izolirane žice, među kojima vlada električna napetost; prema toku ulica razgranjuju se i ti dvostruki vodovi. Električna se sprava „uklapa“ na taj način, da se

jedna njezina stezaljka spoji s jednim vodom, druga s drugim. To uklapanje slabo utječe na sveukupni tok struje. (J a b l o č k o v 1876.).

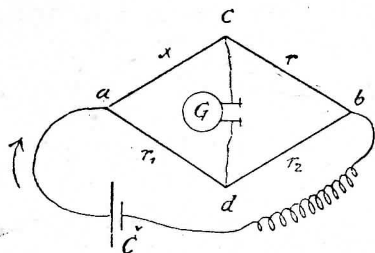
Kod č e p o v n o g a o t p o r n i k a (sl. 211.) po dvije su mjedene pruge, na pr. A i B, koje se gotovo tiču jedna druge, sastavljene žicom određenoga otpora. Ako se među pruge utisne mjedeni čep, struji se otvara prostran put kroz čep, tako da je otpor na putu od A do B jednak 0; ako se čep izvadi, struja ide samo kroz žicu. Uz oveći broj pruga i žica možemo sveukupni otpor po volji mijenjati, ako — gdje treba — izvadimo čepove.



Sl. 211.

Ampermetru, koji pokazuje na pr. do 5 ampera, može se o s j e t l j i v o s t smanjiti, ako stezaljke njegove sastavimo „s p o r e d n o m“ granom („šunt“, prema engl. s h u n t), kojoj je otpor na pr. $1/9$ otpora ampermetra. Struja x ampera, koju želimo izmjeriti, razgranjuje se u struju i, koja teče ampermetrom, i struju $9i$, što teče kroz sporednu granu. Prema zakonu razgranjivanja je $x = i + 9i = 10i$. Jakost je mjerene struje dakle 10 puta veća negoli vrijednost i, što je ampermeter pokazuje.

Ako se pozitivni polovi jednakih članaka jedni s drugima spoje, a isto učini s negativnim polovima, kažemo, da su članci spojeni u bateriju „u s p o r e d n o“. Elektromotorna je sila takve baterije jednaka elektromotornoj sili jednoga članka, otpor je njezin toliko puta manji od otpora jednoga članka, koliko imade članaka. Ako je 10 članaka, svaki s elektromotornom silom E volta i otporom r oma, spojeno usporedno, a izvanji je otpor r' oma, jakost je struje $i = \frac{E}{1/10\, r + r'}$. Ako je unutarnji otpor malen, baterija daje struju toliku kao 1 članak; ako je izvanji otpor malen, jakost je struje upravno razmjerna broju članaka (baš obrnuto nego kod običnoga sastavljanja baterije!).



Sl. 212.

Da se otpor odredi točnije negoli načinom spomenutim u § 181., upotrebljava se W h e a t s t o n e o v most (C h r i s t i e 1833., W h e a t s t o n e 1843.). Struja iz galvanskog članka $\check{C}$ dijeli se u dvije grane: acb i adb; točke c i d tih grana spojene su „m o s t o m“ cd, u koji je uklopljen galvanometar G. Ako su otpori vodiča ac, cb, ad, db redom x (nepoznati otpor), r, r_1, r_2 oma, a udesili smo otpore tako, da kroz galvanometar n e t e č e struja, vrijedi zakon mosta: $x : r = r_1 : r_2$.

Dokaz. Potencijali u točkama a, b, c, d neka su V_a, V_b, V_c, V_d. Kada u mostu nema struje, jakost je struje u ac tolika kao u cb, u ad tolika kao u db. Ako sve te struje izrazimo uz pomoć Ohmova zakona izlazi

$$\frac{V_a - V_c}{x} = \frac{V_c - V_b}{r}, \quad \frac{V_a - V_d}{r_1} = \frac{V_d - V_b}{r_2}.$$

Kad nema u mostu struje, treba da je $V_c = V_d$. Prema tome su brojnici lijevih strana predašnjih jednadžbi jedan drugom jednaki, a i brojnici desnih strana jednaki. Ako se dakle podijeli druga jednadžba s prvom, izlazi $\frac{x}{r_1} = \frac{r}{r_2}$, a odatle premještanjem gore napisani razmjer.

Kod mnogih je mostova vodič adb žica razapeta u pravac; onda je $r_1 : r_2 = ad : db$, dakle

$$x : r = ad : db.$$

Otpor r obično pripada čepovnom otporniku, te je poznat, a dužina ad i db odrede se mjerilom, koje je uz žicu učvršćeno. — Prednost je mosta, što otpor određujemo služeći se samo j e d n o m spravom, koja ima kazaljku, a ta sprava ne treba imati ljestvice, već samo znak za ništicu („nul-metoda“!).

Zad. **148.** Baterija od 3 jednaka usporedna članka šalje struju kroz žicu, kojoj je otpor 1·00 om; kolika je jakost struje, ako je otpor članka 0·30 oma, elektromotorna sila 1·10 volta? [1·00 ampera]

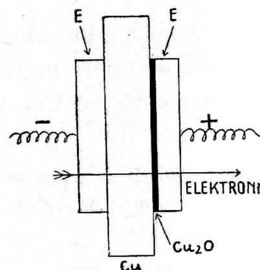
186. Neki podaci o otporu. Ako struja iz članka teče kroz žicu od platine i galvanometar, pa ako se žica ugrijava plamenom, jakost struje spadne: otpor se platine povećava, kad temperatura raste. Slično vrijedi i za druge kovine. Naprotiv otpor ugljena pada, kad se temperatura povisi. K o n s t a n t a n (slitina bakra i nikalja) s a s v i m n e z n a t n o mijenja svoj otpor s temperaturom, a kako mu je uz to specifični otpor velik (31 puta veći negoli u bakra, 4 puta veći nego u nikalja), upotrebljava se kao vodič za otpornike. Slično vrijedi za m a n g a n i n (slitinu bakra, mangana i nikalja). Mijenjanje otpora služi pri mjerenju temperature (isp. § 111.). — Štapić, koji sja u N e r n s t - o v o j žarulji (sastavljen od magnezijeva i drugih oksida), ima kod obične temperature otpor na miljune puta veći, negoli kada je užaren. Zato nije dosta, da se taj štapić nadoveže na električne vodove, već ga treba isprva još i užariti (bilo plamenom, bilo automatičnom električnom grijalicom). — I staklen štap, kad se dosta ugrije, dobro vodi struju. — Kod najnižih temperatura (tekući helij!) otpor olova, žive i t. d. s a s v i m iščezava (K a m e r l i n g h O n n e s 1913.); vodič se u tom slučaju zove s u p r a v o d i č.

Kovna modifikacija elementa s e l e n ima na svjetlosti manji otpor negoli u tmini (H i t t o r f 1852.). Otpor elementa b i z m u t naraste, ako ga stavimo u magnetsko polje (R i g h i 1884.); izmjerivanje magnetskih polja može se dakle nadomjestiti mjerenjem otpora bizmutova.

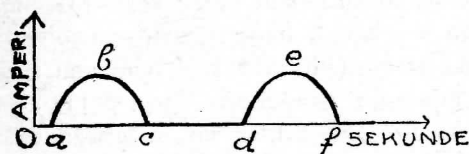
187. Električki ventili i ispravljači. Ima vodiča, koji električnu struju laglje propuštaju u jednom smjeru nego li u protivnom, te djeluju za elektricitet kao v e n t i l i. Takav je vodič na pr. k r i s t a l n i d e t e k t o r. Kod njega se kovinski šiljak dotiče leca olovnoga sjajnika (galenit, PbS) ili druge zgodne tvari i ako kroz taj slijed vodiča puštamo struju, primjećujemo, da

je otpor različit prema smjeru struje. Premda to ventilno djelovanje detektora nije na svima mjestima leca jednako dobro, ipak taj aparatić i danas dobro služi kod najjednostavnijih radioaparata pri otkrivanju električkih valova (lat. *detector*, *otkrivač*).

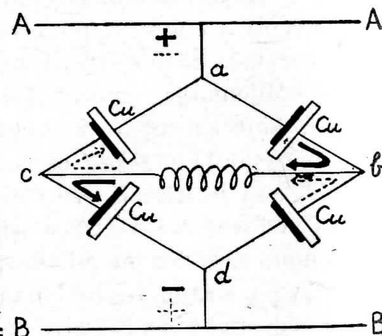
Oksidulov ventil je bakrena ploča *Cu*, koja na jednoj strani nosi „prirastao" sloj bakrenoga oksidula Cu_2O (sl. 213.). Da se može kroz taj ventil voditi struja, ploča se utisne među elektrode *EE* (na pr. od olova), na koje se nadovezuju dovodne žice. Ako napetosti nisu prevelike, struja je do tisuću puta jača, kada je bakar spojen s negativnim polom izvora struje (oksidul s pozitivnim), nego li kada spajamo obratno (Grondahl 1925.). — Nadoveže li se taj ventil na izvor struje slabe izmjenične napetosti, prolazit će struja koja praktički ima vazda isti smjer. Njezina se jakost mijenja otprilike onako, kako je grafički predočeno u sl. 214. crtom *Oabcdef*... (apscise = sekunde, ordinate = amperi!). Kroz polovicu vremena jednoga titraja napetosti nema struje, a iza te „ravnice" dolazi u drugoj polovici vremena titraja „brijeg" struje.



Sl. 213.



Sl. 214.



Sl. 215.

Prema tome jest već jedan ventil ispravljač struje, t. j. sprava, kojoj je svrha, da iz vodova izmjenične napetosti daje struju stalnoga smjera. Da se načini ispravljač, kod kojega nije polovica vremena izgubljena, mogu se sastaviti 4 ventila u namještaju, koji naliči razgranjenju Wheatstoneova mosta (Graetz 1897.). Iz sl. 215. vidi se, kako treba te ventile orientirati. Kada je napetost voda *AA* prema vodu *BB* pozitivna, smjer je struje *abcd*; kada je negativna, smjer je *dbca*; u vodiču *bc* smjer je struje vazda isti i na brijeg struje bez stanke slijedi odmah opet brijeg.

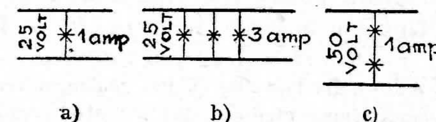
Da struja izađe iz ispravljača ne samo stalnoga smjera nego i (približno) stalne jakosti, gradi se ispravljač sa dva ventila i dva kondenzatora.

4. Električna struja i pojavi u vodiču

188. Struja ugrijeva vodič. Kad žicom teče struja, žica se ugrijeva; ako je struja dosta jaka, žica će se užariti. Kada se ne bi toplina gubila u okoliš, temperatura bi žice jednako rasla; no što viša je temperatura tijela, to ono brže gubi toplinu; temperatura će žice dakle narasti do tolike vrijednosti, da se svake sekunde onoliko topline iz žice izgubi, koliko se strujom stvori. Joule je našao (1844.) zakon, prema kojemu struja proizvodi toplinu. Primjenjujući praktične jedinice, taj zakon glasi: ako napetost $V_a - V_b$ volta šalje kroz vodič struju i ampera, struja stvara u t sek množinu topline

$$Q = (V_a - V_b) \cdot i \cdot t \text{ džula.}$$

Na taj nas zakon navodi ovakovo razmatranje. Uzmimo nekoliko sasvim jednakih žarulja. Napetost 25 volta neka šalje kroz žarulju struju 1 amper (sl. 216a). Nadovežu li se 3 žarulje usporedno (sl. b) na vodove s napetošću 25 volta, teći će u tom primjeru u vodovima struja 3 ampera; kako se u 3 žarulje stvara 3 puta više topline nego li u jednoj, izlazi, da su kraj jednake napetosti i jednakog trajanja topline razmjerne s jakostima struja. — Spoje li se dvije žarulje uzastopce (sl. c), svaka će sjati kao i prije, ako su uklopljene među vodiče s napetošću $2 \times 25 = 50$ volta; ispoređivanjem slika *a* i *c* vidimo, da su kraj jednake jakosti struje i jednakog trajanja topline razmjerne s napetostima. Da je toplina razmjerna vremenu t, samo se sobom razumije.



a) b) c)
Sl. 216.

Jedinice amper, sekunda i džul idu u praktični sustav, pa je u tom sustavu jedinica napetosti, 1 volt, upravo tako odabrana, da bude konstanta razmjernosti Jouleova zakona = 1. Budući da je 1 džul = 0·24 gkal, glasi zakon ugrijevanja, kad se služimo gramkalorijama, amperima, voltima i sekundama $Q = 0{\cdot}24 \,.\, (V_a - V_b)\; i\; t$. Ta se formula može ispitati s pomoću kalorimetra, voltmetra, ampermetra i ure.

Ako se iz izraza za toplinu uz pomoć Ohmova zakona $i = (V_a - V_b) : r$ izbaci napetost, dobiva se $Q = i^2 r t$. Riječima: kada se jakost struje u vodiču stalnoga otpora podvostruči, toplina se stvara četverostrukom brzinom; zatim: kada struja ide redom različitim vodičima, stvara u njima množine topline, koje su razmjerne otporima. Otuda dolazi, da se žica u žarulji usja, premda je temperatura dovodnih žica neznatna; žica naime u žarulji ima otpor na tisuće puta veći, negoli jednako dugačak komad dovodne žice.

Željezna žica munjovoda treba da ima prorez bar 1 cm²; olovne žice morale bi imati prorez veći (bar 3 cm²), jer je specifični otpor olova veći, jer mu je specifična toplina manja i jer se već kod 327 °C tali. Za bakrenu je žicu propisan prorez ½ cm².

Zad. **149.** Koliko će najmanje trebati vremena, da električna grijalica, kojom teče struja $1^1/_4$ ampera pod napetošću 220 volta ugrije 200 g vode od 20 °C do 100 °C? [242 sek]

189. Energija i snaga struje. Kad se iz galvanskoga članka pušta struja kroz žicu, u žici se stvara toplinska energija, a u članku se troši kemijska energija; toplina tada nastaje na trošak kemijskih promjena. Toplina u žaruljama uklopljenima u mrežu električne središnjice nastaje od mehaničke energije potrošene za pogon generatora (§ 213. i t. d.) u središnjici. Uostalom se električna energija ne treba trošiti baš na ugrijevanje vodiča; struja može goniti motor, pa se u tom slučaju strujom dobiva mehanička energija. Za središnjicu, koja s napetošću $V_a - V_b = 110$ volta šalje u mrežu struju jakosti 1000 ampera, svejedno je, služi li ta struja za žarulje ili motore: potrošak je energije za središnjicu u oba slučaja isti. Prema tome je $(V_a - V_b) \cdot i \cdot t$ opći izraz za energiju, koju neki izvor struje u izvanjem vodiču između točaka a i b stvara. — Jednostavniji postaje taj izraz, ako se uvede množina elektriciteta $i\,t = e$ kulona. Onda je energija dana sa $(V_a - V_b) \cdot e$

Kad se iz središnjica vodi struja u znatniju daljinu, energija se trati na ugrijevanje vodova. Da bude taj gubitak malen, dovodne žice treba da su debele i od tvari malenoga specifičnoga otpora (bakar!). Kako se radi skupoće kovine u tom ne može ići preko neke granice, uklanjaju se prekomjernim gubicima i time, da središnjice uređuju s velikom napetošću. Treba li na pr. goniti 4 motora, od koiih je svaki određen za 110 volta napetosti i struju 500 ampera, mogu se oni poređati usporedno ili uzastopce; u prvom je slučaju jakost struje $4 \times 500 = 2000$ ampera, a napetost vodova 110 volta, u drugom je jakost struje 500 ampera, napetost vodova $4 \times 110 = 440$ volta; no dovodeći k motorima struju iz veće udaljenosti manje ćemo u vodovima izgubiti energije, ako je jakosti struje 500 ampera, negoli kad je jakost 2000 ampera. S gospodarskog je gledišta dakle povoljnije, kad središnjica radi s velikom napetošću.

Ako se energija izvedena strujom podijeli s vremenom, dobiva se snaga struje (isp. § 52.). Ako je jakost struje i ampera, napetost među stezaljkama izvora elektriciteta $V_a - V_b$ volta, snaga je struje

$$(V_a - V_b) \cdot i \text{ vata.}$$

Za pogon motora, kroz koji kod 220 volta napetosti teče struja 10 ampera, treba snaga struje $220 \times 10 = 2200$ vata $= 2{\cdot}2$ kilovata $= 2{\cdot}2 \times {}^4/_3$ KS $= 2{\cdot}9$ KS.

Za određivanje snage električne struje trebaju ampermetar i voltmetar; jednostavnije je, ako se umjesto toga upotrebi vatmetar, sprava, na kojoj vrijednost snage neposredno čitamo. Električno brojilo pokazuje potrošak električne energije izražen kilovatsatima.

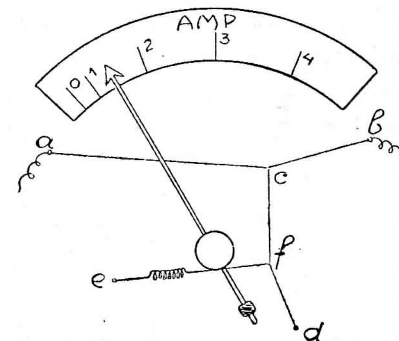
Zad. **150.** Koliko stoji u mjesec dana rasvjeta sa 10 žarulja određenih za 220 volta, ako svaka žarulja propušta struju 0·1 ampera, a služi na dan 3 sata? cijena struje neka je D 5 po kilovatsatu. [D 99

Zad. **151.** Koliko se stvori u 1 sek topline u vodiču, ako je snaga struje 22 kilovata? [5·3 kgkal]

Zad. **152.** Koliko je puta grijanje električnom strujom skuplje negoli plinom, ako 1 m³ plina stoji D 3 i daje 5000 kgkal, dok 1 kilovatsat struje stoji D 5? [9·6 puta]

190. Primjena topline dobivene strujom. *Rastalni ulošci* (Edison 1878.) priječe, da ne bi nepažnjom ili nezgodom nastale prejake struje. Između izvora struje i sprave, u kojoj trošimo struju, uklapa se u tok njezin rastalni uložak, t. j. kratka žica primjereno tanka; budući da je žica kratka, njezin je otpor neznatan, te ne smeta struji. Ako struja prekomjerno naraste (na pr. radi kratkoga spoja), žica se rastali i struja se prekine. Time se u jednu ruku zaštićuju sprave trošilaca, sprečavaju požari, a u drugu se ruku i električna središnjica brani od teških smetnja. Prema potrebi uzimlju rastalne uloške s tanjom žicom za slabije struje, s debljom žicom za jače struje, pa ima uložaka za najveće jakosti na pr. 6 amp, pa 10, 15, 20 . . . ampera.

Toplinski ampermetar. Žica, kojom teče struja, ugrije se, a time i produlji. Taj se pojav primjenjuje za mjerenje struje kod toplinskoga ampermetra. Žicu učvršćenu na krajevima a i b (sl. 217.) nateže žica dc, a ovu elastično pero i žica ef; potonja žica pomičući se vrti koloturu, koja nosi kazaljku. Kad žicom ab teče struja, žica popusti i kazaljka se pomakne. Ljestvica toplinskoga ampermetra nije jednolična (isp. § 179.). Drugo je svojstvo toga ampermetra, da kazaljka ide kod porasta struje vazda na istu stranu, imala struja jedan ili drugi smjer. Toplinski ampermetar može dakle pokazivati i izmjeničnu struju, t. j. struju, što se dobiva iz voda izmjenične napetosti. — Izmjenična struja periodski mijenja svoju jakost između neke najveće vrijednosti u jednom smjeru i jednake najveće vrijednosti u protivnom smjeru. Ako se kazaljka toplinskoga ampermetra izmjeničnom strujom zakrene toliko, koliko bi se zakrenula, da kroz ampermetar prolazi stalna struja jakosti i ampera, kažemo, da je (srednja) jakost izmjenične struje $= i$ ampera.



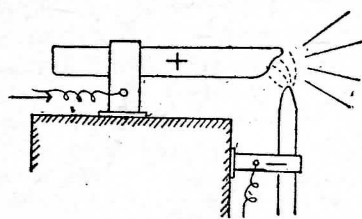
Sl. 217.

Uzvojnice električnih strojeva (transformatora i t. d.) ne smiju se strujom preteretiti, da ih ne bi visoke temperature uništile (iznad 105 °C pamuk izolacije pougljeni!). — Struje velike napetosti (predašnji §!) vode se u daljinu visokim, dobro izoliranim žicama, ali u novije vrijeme poput inih struja i podzemnim kabelima (franc., srednjelat. *capulum*, *konopac*).

191. Električna rasvjeta. U električnoj žarulji (Edison 1879.) starije vrsti pušta se struja kroz nit od ugljena, koja je zatvorena u staklenoj „kruški“, iz koje je uzduh isisan. Nit se strujom užari, ali ne izgori, jer nema kisika. U pravilnoj upotrebi nit se polako „raspršava“ i najposlije

„pregori"; kod preterećenja (t. j. prevelike napetosti) žarulja odmah strada. Te žarulje trebaju 3 ili više vata za svaku „svijeću" (svijeća, mjera za jakost izvora svjetlosti), te na pr. žarulja od 20 svijeća treba 60 vata. — Manje snage — 1 vat po svijeći — trebaju žarulje sa kovnom niti (najprije od osmija, onda od tantala, sada od volframa). — T. zv. poluvatne ili „plinom punjene" žarulje trebaju, poimence kad su građene za više stotine svijeća, još manje snage, sve do $1/2$ vata po svijeći. Užarena nit njihova nalazi se u dušiku, jer se pokazalo, da prisutnost plina usporuje raspršavanje; može se kod njih primijeniti jača struja i temperatura znatnije povisiti, a da ipak raspršavanje ne bude prejako; visoka temperatura zgodna je poradi toga, jer od sveukupne energije žarenja to veći dio pripada zrakama svjetlosti, što je viša temperatura. Međutim plin odvodi toplinu; da se otešća odilaženje topline, nit je svinuta u usku uzvojnicu, koja ispunja samo malen prostor posred žarulje. — Štapić Nernstove žarulje (1898., isp. § 186.) nalazi se u uzduhu; sastavljen je od oksida, koji ne mogu izgorjeti. Ta žarulja služi u znanstvene svrhe.

Električna lučnica (Davy, valjda već 1808.) starija je od žarulje. U njoj se dva štapa od ugljena namjeste tako jedan do drugoga, da se mogu po jednim krajem dotaći (sl. 218.). Jedan je štap spojen s pozitivnim, drugi s negativnim vodom struje i to kroz otpor primjerene veličine. Ako se krajevi zbliže i dotaknu, nastane električna struja; razmaknu li se iza toga krajevi, ne će struja prestati, nego će ona širokim svjetlim trakom prelaziti s jednoga ugljena na drugi. Taj se svjetli trak zove električni luk, jer doista ima oblik luka, ako oba ugljena stoje na pr. horizontalno.

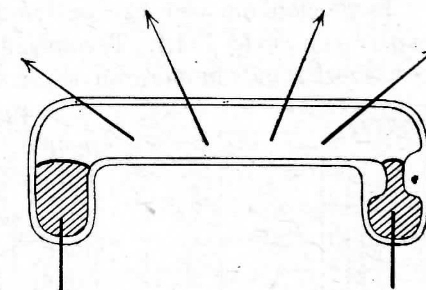


Sl. 218.

Temperatura je pozitivnoga ugljena lučnice viša od temperature negativnoga, pogotovu se ističe visokom temperaturom pozitivni „krater", malena udubina na kraju pozitivnoga ugljena. Najveći dio svjetlosti izlazi iz pozitivnoga kratera kao iz jedne točke; zato a još i stoga, što sjajem nadmašuje sve druge umjetne izvore svjetlosti, lučnica se osobito zgodno primjenjuje kod sprava za projekciju slika.

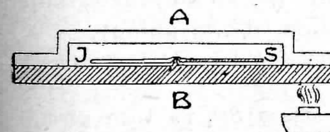
Ugljen lučnice izgara, i to pozitivni brže negoli negativni, pa treba postepeno oba štapa primicati. To se čini rukom, ili se štapovi zbližuju sami od sebe osobitim elektromagnetskim automatom. — Lučnica troši manje vata po svijeći negoli žarulja, no radi jake svoje svjetlosti nije zgodna za rasvjetljivanje manjih prostorija. Štapovi od ugljena ili su „homogeni" ili imadu „stijenj", koji je sastavljen od čađe i primjesina; „efektni" je ugljen sav natopljen nekim solima. Stijenj čini, da je krater postojaniji, a primjesine olakšavaju prelaženje struje i čine, da najveći dio svjetlosti izlazi poglavito iz luka. — Okisivanje atmosfernoga dušika (pravljenje umjetnoga gnojiva!) izvodi se u temperaturi jakih lukova dugih po više metara (na pr. 8 m kod napetosti 4000 volta). — Umjesto ugljena mogu služiti kao uporište električnom luku i druge tvari, na pr. štapovi od bakra.

Živina svjetiljka načinjena je od zatvorene savinute cijevi (sl. 219.) u kojoj su živine pare i dvije elektrode od tekuće žive; elektrode su kroz otpor spojene s vodovima struje. Ako se naginjanjem cijevi tekuća živa slije i opet rastavi, nastaje tok struje kroz živine pare, koje pri tom sjaju osobitom zelenom bojom. Luk živine svjetiljke daje osim svjetlosti još i veliko obilje ultraljubičastih zraka, pa se zato i upotrebljava u znanosti i liječništvu. Budući da staklo upija te zrake, cijev je živine svjetiljke od kvarca („kvarcova svjetiljka"); kvarc se uz to tali kod više temperature negoli staklo; da mu ipak ne bi temperatura odviše narasla, treba svjetiljku hladiti (vodom ili „rebrima za hlađenje"). — U natrijevoj svjetiljci svjetle natrijeve pare jakom žutom svjetlošću.

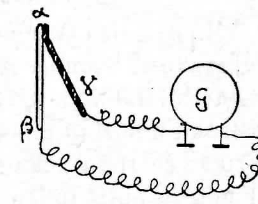

Sl. 219.

Imate još i rasvjeta Geisslerovim cijevima. Cijevi za reklamu, koje svjetle crveno (narančasto), punjene su plinom neonom, a dugačke su po nekoliko metara; tlak je u njima iznad 0·7 mm, a napetost se uzimlje na pr. 100 volta za svaki metar dužine. (Claude, 1911.)

192. Termostruje. Ako se dvije različite kovine A i B (sl. 220.) svojim krajevima tako spoje, da čine okvir, a oba spojišta imadu različite temperature, teče okvirom električna struja (Seebeck 1821.); ta se struja zove termostruja. Da se pokaže termostruja, spomenuti se okvir namjesti u magnetski meridijan, a u okvir se stavi deklinatorna igla SJ; grije li se jedno spojište, igla se makne iz meridijana. — Ako su dva različita vodiča na jednom mjestu α spojena (sl. 221.), čine termočlanak; polovi termočlanka β i γ mogu se spojit s galvanometrom G žicama. Ako sva spojišta izuzevši α imadu jednaku temperaturu, iskustvo pokazuje, da je elektromotorna sila tolika, kolika bi bila, kad bi se polovi β i γ neposredno spojili jedan s drugim. — Elektromotorna je sila termočlanka neznatna: ona kod „jakoga" termočlanka željezo-konstantan iznosi samo 0·0042 volta, ako su temperature spojišta 20 °C i 100 °C. Ipak može termostruja biti vrlo jaka; ako je okvir u gornjemu primjeru vrlo debeo, otpor mu je sasvim malen, pa — u skladu s Ohmovim zakonom — jakost struje može izaći i preko 100 ampera.



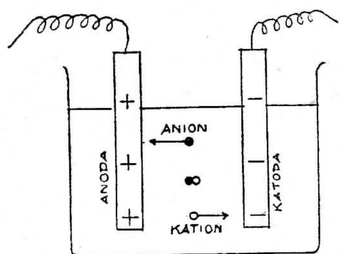
Sl. 220.



Sl. 221.

Termočlankom u svezi sa „miliampermetrom" mogu se mjeriti temperature (§ 111.). Termočlanci sastavljaju se u termobaterije, koje u svezi s galvanometrom služe kod mjerenja toplinskih zraka.

193. Elektroliza. Vodiče elektriciteta treba lučiti u dvije skupine: jedni se, kad propuštaju električnu struju, kemijski ne mijenjaju, drugi se mijenjaju. Kovine (pa i slitine njihove, na pr. mjed) idu u prvu skupinu, u drugu idu rastopine soli, rastaljene soli, mnoge rastopine kiselina i lužina. Sve se ove potonje tvari strujom raspadaju. Pojav rastvaranja strujom zove se elektroliza (grč. λύω, *rješavam*), a tvari, koje se mogu strujom rastaviti, elektroliti. Struja se vodi kroz elektrolit na taj način, da se u nj rastavljeno utaknu (sl. 222.) dvije elektrode (grč. ὁδός, *put*); one su vrlo često od platine, da ne bi elektrolit na elektrodu kemijski utjecao; elektroda sastavljena s pozitivnim polom izvora elektriciteta zove se anoda, druga katoda (ἀνά, *gore*; κατά, *dolje*); proizvodi kemijskog raspadanja idu na elektrode; njihove se najsitnije čestice zovu ioni (ἰών, *idući*); na katodi se sabire kation, na anodi anion; potonja se 3 naziva upotrebljavaju još i za oznaku vrsti izlučene tvari bez obzira na množinu.



Sl. 222.

Primjeri elektrolize vodenih otopina nekih tvari (lijevo od pravca, koji razdvaja kemijsku formulu otopljene tvari, stoji kation, desno anion):

solna kiselina, $H \mid Cl$; vodik se u obliku mjehurića diže uz katodu, klor se sabire i apsorbira u vodi uz anodu;
sumporna kiselina, $H_2 \mid SO_4$; kemijskim djelovanjem aniona SO_4 na vodu nastaje opet sumporna kiselina, a i kisik, te se mjehurići kisika dižu uz anodu; ako se taj kisik smiješa s vodikom, što se sabire na katodi, dobiva se plin praskavac;
modra galica, $Cu \mid SO_4$; bakar se taloži na katodi;
srebrov nitrat, $Ag \mid NO_3$; anion NO_3 daje s vodom dušičnu kiselinu i kisik;
kalijeva lužina, $K \mid OH$; kation K djeluje na vodu i opet daje lužinu, a uz to vodik; anion OH djelujući na vodu daje kisik.

U svima su primjerima kovine i vodik kationi.

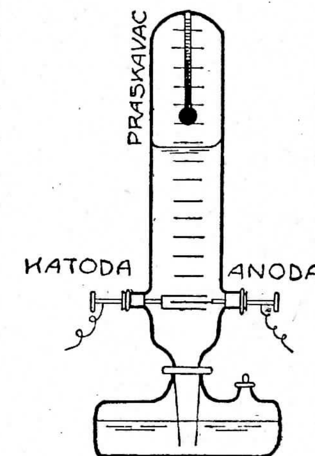
Množina izlučenoga iona vlada se po zakonima Faradayevima (1833.). Struja jakosti 1 amper izluči iz rastopine sumporne kiseline u 1 min 10·44 cm^3 praskavca (760 mm, 0 °C!); u jednakom bi vremenu struja 2 ampera izlučila dvostruku množinu plina, t. j. 20·88 cm^3, a struja 3 ampera trostruku množinu. U drugu će ruku neka struja u 2 minute izlučiti 2 puta toliko koliko u 1 min, u 3 min 3 puta toliko i t. d. Ukratko: množina je izlučenoga elektrolita razmjerna umnošku jakosti struje i vremena. Kako je taj umnožak jednak množini elektriciteta (§ 176.), izlazi

I. zakon elektrolize: množina je izlučenoga elektrolita razmjerna množini elektriciteta, što je prošao kroz elektrolit.

Teče li struja redom kroz rastopinu solne kiseline i srebrova nitrata, izlučit će toliko atoma srebra Ag iz nitrata, koliko izlučuje atoma vodika H iz kiseline; znade se to otuda, što na svaki gram izlučenoga vodika dolazi 108 g izlučenoga srebra, a masu atoma vodikova označujemo sa 1, atoma srebrova sa 108. Ioni su spomenutih elektrolita kemijski „jednovaljani", ali slično vrijedi i u zamršenijima primjerima, pa se može općeno izreći

II. zakon elektrolize: ista struja izlučuje iz različitih elektrolita kemijski ekvivalentne množine iona.

Na tim se zakonima osniva primjena elektrolize kod mjerenja struje. Prema množini izlučene tvari (grami, kubični centimetri) može se odrediti množina elektriciteta (kuloni). Sprave u tu svrhu udešene zovu se kulometri. Vrlo je poznat kulometar sa praskavcem (sl. 223.), ali je znatniji kulometar sa srebrom. Potonji služi kod definiranja međunarodnoga ampera: struja ima jakost 1 međunarodni amper, ako u 1 sek izluči iz rastopine srebrova nitrata 1·118 mg srebra. Kraće se može reći, da se spomenuta množina izluči 1 međunarodnim kulonom. Te su definicije tako odabrane, da bude međunarodni amper u što boljem skladu s amperom el.-magn. praktičnog sustava. Tako određen amper zajedno s omom definiranim u § 182. jesu u međunarodnom sustavu električnih jedinica „glavne jedinice". S pomoću njih i sekunde (jedinice vremena) definiraju se onda „izvedene jedinice": međunarodni volt, kulon, vat, džul, farad i henri. U opreci prema tima jedinicama zovu se prvobitni amper, om itd., koji su elektromagnetske praktičke jedinice (§§ 155. i 176.), također „apsolutni". Postoji zaključak, da se početkom g. 1940. ukidaju spomenute međunarodne jedinice i umjesto njih zakonima uvedu apsolutne (u novim definicijama), ali taj zaključak nije proveden.



Sl. 223.

Primjena je elektrolize raznovrsna. Davy je elekrolizom našao (1807.) elemente kalij i natrij; u metalurgiji (priređivanju kovina; μεταλλουργός, *kovinarski radnik*) elektrolizom se dobivaju aluminij, bakar i druge kovine. — S pomoću elektrolize mogu se predmeti prevući slojem kovine, na pr. posrebriti, pozlatiti i t. d. (galvanostegija; στέγω, *pokrivam*); predmet treba staviti kao katodu u zgodan elektrolit, pa se kovina strujom na pred-

metu istaložuje. — U galvanoplastici (πλαστική, *kiparstvo*) prave se kovni otisci (M. H. Jacobi i Spencer 1837.), što je osobito znatno pri umnažanju slika.

Ako se izvodi elektroliza sumporne kiseline sa tutijinim elektrodama, anion se SO_4 sa tutijom anode spaja u bijelu galicu, a ta se u vodi topi; time se anoda sve više troši. Sličan primjer nalazimo kod struja skitnica; to su ogranci struja električnoga tramvaja, koji umjesto tračnicama teku u središnjicu kroz zemlju, plinovodne ili druge kovne cijevi; gdje struja prelazi s kovine u zemlju (elektrolit), kovina se troši. Štetne takve rastvorbe mogu nastati i kod parnih kotlova, bilo od galvanskih struja, bilo od termostruja. — Čista se tutija u razrijeđenoj sumpornoj kiselini jedva topi; kako je površina tutije obično nejednaka sastava, nastat će uz površinu tutije uronjene u kiselinu „lokalne“ struje, kao da se diljem površine nalazi niz nepravilno porazmještenih galvanskih članaka; te struje izjedaju tutiju, a mogu se ukloniti, ako se tutija amalgamiranjem učini jednoličnom. — Štapić Nernstove žarulje i staklo (§ 186.) jesu elektroliti, kojima se ioni kod obične temperature teško pomiču.

Zad. 153. Kolika je jakost električne struje, koja u srebrovu kulometru u 30 min izluči 2·024 g srebra? [1·006 amp]

Zad. 154. Kolika je jakost električne struje, koja u 3 min 20 sek izluči 0·200 litre plina praskavca, ako se obujam mjeri kod 20 °C i tlaka 750 mm? [5·28 amp]

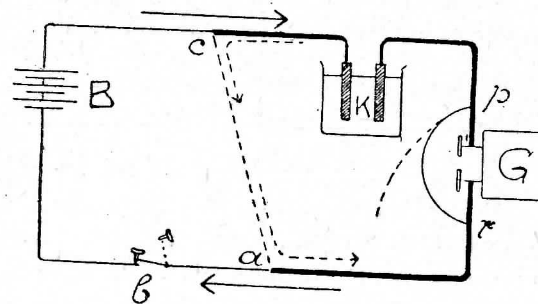
Zad. 155. Napetost 1 volt šalje kroz otpor 1 om struju 1 amp; za koliko se razlikuje elektromagnetski volt od međunarodnog, ako je el.-magn. amper za 0·007% veći, el.-magn. om za 0·052% manji od međunarodne jedinice? [on je za 0·045% manji]

Zad. 156. Koliko elektriciteta treba da prođe rastopinom srebrova nitrata, da se izluči 107·88 g srebra? [96500 kulona]

194. Elektroliza i atomistika. Faradayevi se zakoni objašnjuju, ako pristanemo uz kemijsku nauku o atomima, a pomišljamo, da je i elektricitet sastavljen iz najsitnijih čestica; prema toj je nauci naboj jednovaljanog iona elementarni naboj (pozitivnoga ili negativnoga) elektriciteta (§ 153.). Ioni donose svoje naboje k elektrodama i tamo ih predaju, pa baš u tom prenošenju naboja i jest elektrolitično vođenje električne struje. Dvostruk broj iona prenosi dvostruk naboj, u skladu sa I. zakonom elektrolize. Budući da negativna elektroda privlači katione, naboj je njihov pozitivan; naboj je aniona negativan. I II. zakon elektrolize slijedi iz nauke o ionima (kako?). — Ako je poznat broj atoma u izlučenom elektrolitu, može se izračunati, kolik je naboj najmanje množine elektriciteta. Kod elektrolize srebrova nitrata $AgNO_3$ treba za prenos 1 kulona elektriciteta 0·001118 g srebra; u 1 g vodika ima $6{\cdot}03 \times 10^{23}$ atoma (jer u 2 g imade isto toliko molekula; isp. § 120.); kako je atom srebra 108 puta teži od atoma vodikova, ima u 108 g srebra također $6{\cdot}03 \times 10^{23}$ atoma. Dakle se 1 kulon elektriciteta prenosi sa $0{\cdot}001118 : 108 \times 6{\cdot}03 \times 10^{23}$ atoma $= 6{\cdot}24 \times 10^{18}$ atoma, pa je prema tome isto toliko atoma elektriciteta u 1 kulonu sadržano. 1 atom elektriciteta ima dakle naboj $1 : (6{\cdot}24 \times 10^{18}) = 1{\cdot}60 \times 10^{-19}$ kulona $= 1{\cdot}60 \times 10^{-19} \times 3 \times 10^{9} = 4{\cdot}8 \times 10^{-10}$ el.-st. c-g-s-jed.

Došlo se do poznaje, da električna struja nije neposredni uzrok raspadanju elektrolita. U vodenoj otopini solne kiseline HCl ima iona $\overset{+}{H}$ i $\overset{-}{Cl}$, ako i nema elektroda ni električnoga polja; molekule su elektrolita „razdružene“ ili disociirane (lat. *socius, drug*) u ione. Koliko je postotaka molekula elektrolitovih razdruženo, zavisi o fizikalnim prilikama (temperaturi, razrijeđenosti i t. d.). Ako se u elektrolitu uvođenjem elektroda pobudi električno polje, ne treba polje tek da kida molekule u ione, već je zadaća polja samo ta, da gotove ione tjera prema elektrodama (Arrhenius 1887.). U sl. je 222. natuknuto, kako pozitivni ion, crni krug, ide prema katodi, a negativni ion, prazni krug, prema anodi; nerazdružene molekule ne sudjeluju u prenošenju elektriciteta. — Što je više iona i što se lakše oni pomiču, to manji otpor stavlja elektrolit struji. Vrlo je velik otpor čiste vode. Za savršeno čistu vodu našlo se, da joj je specifični otpor kod 18 °C jednak $2{\cdot}6 \cdot 10^{6}$ (om, cm), što je gotovo $3 \cdot 10^{10}$ puta više, negoli specifični otpor žive. Ioni su vode $\overset{+}{H}$ i $\overset{-}{OH}$, a silni električni otpor vode dolazi otuda, što je samo malo njezinih molekula razdruženo (Kohlrausch 1894.).

195. Galvanska polarizacija. Iz galvanske baterije B (sl. 224.) neka se s pomoću platinenih elektroda pušta struja kroz „elektrolitičnu stanicu“, u kojoj je razrijeđena sumporna kiselina K; u tok struje uklopljen je galvanometar G, kojemu je sporednom granom pr smanjena osjetljivost. Ako se struja kod b prekine, zatim ukloni sporedna grana galvanometra i žicom ac sastavi nov krug struje, koji ne sadrži baterije, galvanometar pokazuje i opet struju; ta struja postaje sve slabija, a smjer je njezin (prekinute strelice!) protivan smjeru prvobitne struje (izvučene strelice!). Elektrolizom sabrao se na katodi vodik, na anodi kisik; radi toga se elektrode vladaju kao dva različita vodiča, a elektrolitična stanica kao galvanski članak; ona je poput članka dobila polove, pa se taj pojav zove polarizacija, točnije: galvanska polarizacija (jer se izraz „polarizacija“ upotrebljava i u drugim značenjima). Elektromotorna sila pobuđena polarizacijom ima takav smjer, da nastoji spriječiti struju, kojom je izazvana. Ona je uzrok, da ne može kroz elektrolit teći struja, ako napetost baterije ne premaši njezinu vrijednost.



Sl. 224.

Kad galvanski članak daje struju, nastaje i u njemu elektroliza, a nastaje i polarizacija, ako se ne pobrinemo, da proizvode elektrolize, koji smetaju, uklonimo Poglavito vrijedi to za vodik, koji se sabira na pozitivnom vodiču članka (taj je vodič za elektrolit katoda!); vodik treba okisivanjem učiniti neškodljivim (na pr. kromovom kiselinom, manganovim dioksidom i t. d.).

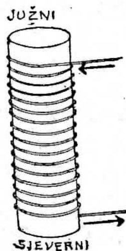
Znatna je praktična primjena polarizacije kod „sekundarnoga članka" ili akumulatora. To je elektrolitična stanica, koja u struji, što nastane polarizacijom, vraća gotovo onoliko energije, koliko smo strujom prije u njoj potrošili. Našlo se, da je znatan učinak polarizacije kod stanice, što se dobije, kad se olovne ploče urone u vodenu otopinu sumporne kiseline (Sinsteden 1854.); na tom se osniva izum olovnoga akumulatora (Planté 1859.; usavršio je taj izum Faure 1882.), kojemu su ploče na osobit način priređene. Akumulator se „nabija" t. j. pušta se kroza nj struja iz drugoga izvora elektriciteta, a onda se može „izbijati" t. j. on može i sam dati struju. Prednost je akumulatora pred običnim galvanskim člancima, što se može mnogo energije iz njega crpsti, a da se tvar njegova ne troši; unutarnji je otpor akumulatora malen, a elektromotorna sila kod izbijanja kroz dugo vrijeme stalna, otprilike 2 volta. Akumulatori se obično nabijaju iz vodova električnih središnjica. (Lat. *accumulo, gomilam*).

Kemijskim procesom kod nabijanja poveća se množina sumporne kiseline u akumulatoru; time i specifična težina tekućine naraste.

S olovnim akumulatorom treba pomnjivo postupati; ne valja ga tresti, a ni opterećivati strujom, koja je prema širini ploča prejaka; on se ne smije izbiti ispod neke najmanje napetosti (oko 1·8 volta) i t. d. Manje je osjetljiv akumulator, koji je građen iz željeza, nikalja i kalijeve lužine (Edison 1904.); elektromotorna mu je sila u većem dijelu izbijanja $1^1/_4$ volta; laglji je od olovnoga akumulatora.

5. Električna struja i magnetsko polje

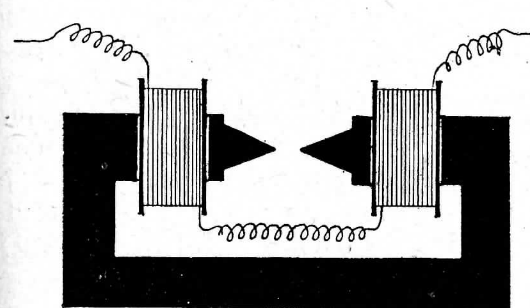
196. Elektromagnet. Električna struja djeluje na magnetsku iglu, ona izvodi u svom okolišu magnetsko polje. Dođe li željezo u blizinu vodiča, kojim teče struja, pobudi se u njemu influencijom magnetizam. Taj je magnetizam osobito jak kod elektromagneta (Sturgeon 1825.). Oko jezgre od mekoga željeza namotano je mnogo uzvoja izolirane žice; teče li žicom električna struja, elektromagnet je „pobuđen"; kad se struja prekine, preostane samo neznatan remanentan magnetizam. Polovi elektromagneta određuju se Ampèreovim pravilom, jer na koju bi stranu struja tjerala sjeverni pol magnetne igle, na istu će stranu namještati sjeverne polove elementarnih magneta, pa će se na toj strani pojaviti i sjeverni pol elektromagneta (sl. 225.).

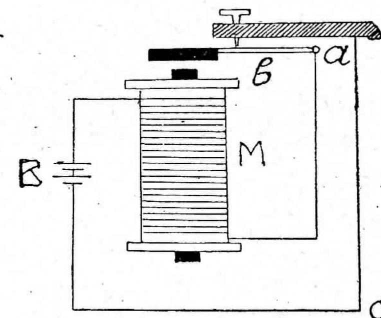


Sl. 225.

Elektromagnetom se dobivaju najjača magnetska polja; granica je za jakost polja u tome, što struja ne može premašiti

neke vrijednosti; prejaka bi naime struja visokom temperaturom razorila elektromagnet. Kod najvećih elektromagneta struja teče stijenama bakrenih cijevi, a kroz same cijevi teče voda, kojom se elektromagnet hladi. — Sl. 226. prikazuje jednostavan oveći elektromagnet. (Crno u slici znači željezo.)


Sl. 226.



Sl. 227.

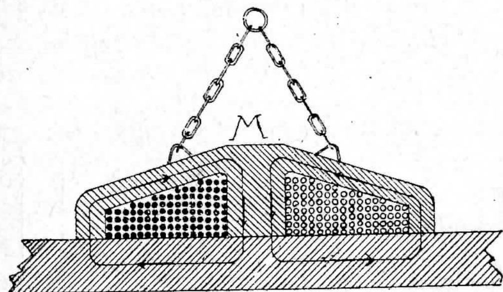
U elektromagnetskom prekidaču struje (Wagner 1837.) put strujin ide s jednog pola baterije ili članka B (sl. 227.) uzvojima M, dijelom ab elastičnoga pera u točki a, učvršćenoga, pa prelazi dotačištem b kroz kovni vijak i žicu c na drugi pol baterije; elastično pero nosi kotvu od mekoga željeza. Kad se u b pero dobro dotiče vijka, otpor je dotačišta neznatan, struja jaka, pa magnet privuče kotvu; time se struja kod b prekine, magnet izgubi magnetizam, a kotvu zaustavi elastičnost pera, koja kotvu povuče natrag; kod b se onda opet struja sklopi i igra se ponovi. Osim za automatsko prekidanje struje služi ta sprava i kod električnoga zvonca, gdje je na kotvi učvršćen batić zvonca.

Jakost se struje prekidačem periodično mijenja, ona je valovita struja. Ako se jakost valovite struje mjeri ampermetrom sa pokretnim okvirom, izlazi druga vrijednost, negoli kad mjerimo toplinskim ampermetrom. Prvi ampermetar pokazuje „aritmetičnu" sredinu svih časovitih vrijednosti jakosti struje, dok toplinski ampermetar daje drugi korijen sredine svih kvadrata časovitih jakosti. Najvećma se razlika obadvaju ampermetara pokazuje kod izmjenične struje (specijalnoga primjera valovite struje).

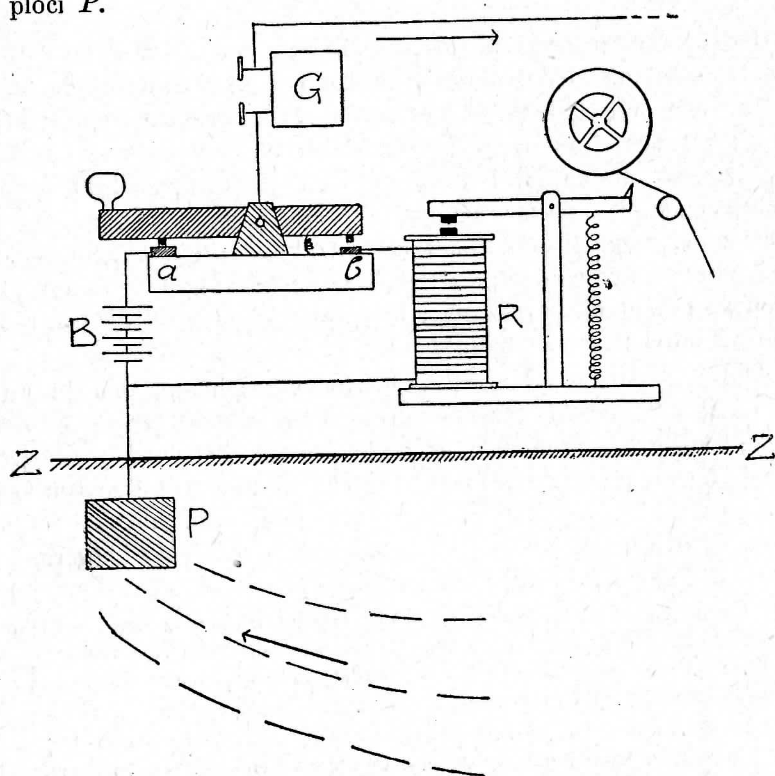
U liječništvu se elektromagnetom vade željezni trunovi iz oka. — Elektromagneti pobuđivani s nekoliko kilovata snage dižu i prenose željezne terete teške po više tona. U slici (sl. 228.) crte sa strelicom znače silnice, što teku kroz magnet M i teret T. — Velik je broj automatskih uredbi s elektromagnetima.

Zad. **157.** Kod elektromagnetskoga ampermetra struja teče uzvojnicom i uvlači u uzvojnicu komad mekoga željeza, koji je elastično učvršćen; pokazuje li ta sprava izmjeničnu struju?

197. Elektromagnetski brzojav. Među elektromagnetskim telegrafskim (τῆλε, *daleko*; γράφω, *pišem*) sustavima najpoznatiji je Morseov telegraf-pisar (1835.). Struja se na postaji odašiljanja na mahove spaja, teče u postaju primanja i tamo pobuđuje elektromagnet, te ovaj privuče kotvu; na kotvi je učvršćena sprava za pisanje, koja na papirnatoj vrpci, što se pod njom pomiče, bilježi znak, kadgod je kotva privučena. — Znamenito je odkriće (Steinheil 1840.), da ne treba postaje spojiti sa dvije žice, već jednu žicu može nadomjestiti zemlja; u tu se svrhu od svake postaje vodi žica u zemlju *ZZ* (sl. 229.) i tamo završuje na velikoj kovnoj ploči *P*.



Sl. 228.



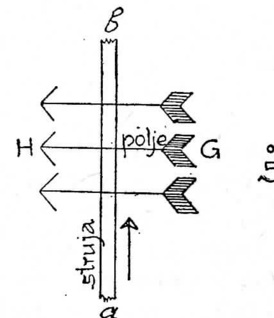
Sl. 229.

U slici je prikazan jedan način, kako se mogu telegrafske sprave raspoređati. Svaka postaja imade: 1. bateriju *B*, 2. Morseov ključ *ab* za davanje znakova, 3. receptor ili primalac *R* za primanje znakova. Ključem se uklapa u krug struje bilo receptor (doticaj *b*) bilo baterija (doticaj *a*); ako ne diramo ključa, elastičnim se perom podržaje doticaj *b*. Umjesto receptora uklapa se baterija, ako se pritiskom na tipku izvede doticaj kod *a*. Kad se pritisne na tipku prve postaje, teče struja iz baterije *B* prve postaje u receptor druge postaje itd. Galvanometar *G* pokazuje, nije li možda spoj postaja prekinut.

Ako bi zbog velikoga razmaka struja, što među postajama teče, bila preslaba, da bilježi znakove, zadajemo toj struji lakši posao, da spaja lokalnu ili mjesnu bateriju na postaji primanja; lokalna baterija daje struju, koja sigurno bilježi znakove, jer se može načiniti jaka, koliko treba. Elektromagnet, koji spaja lokalnu bateriju, zove se relais (franc. *mjesto, gdje se mijenjaju konji*).

Dok se brzojavke u Morseovu telegrafu primaju napisane osobitim znacima (Morseov alfabet), kod Hughesova se telegrafa-tiskara (1855.) brzojav predaje tipkanjem (kao kod glasovira), a izlazi na postaji primanja naštampan običnim slovima.

Telegrafske su žice željezne ili bakrene. One se vode nadzemno preko stupova, kroz more kabelima. Pri polaganju podmorskih kabela trebalo je isprva svladati znatne teškoće.



Sl. 230.

198. Djelovanje magnetskoga polja na struju. Ako struja teče žicom *ab* (sl. 230.) u smjeru strelice, a žica se nalazi u magnetskom polju smjera *GH*. polje djeluje na struju silom, koja je okomita i na smjeru struje i na smjeru polja. Smjer se ove sile može posredno odrediti Ampèreovim pravilom, ako pomišljamo, da je polje izvedeno sjevernim polom *S*; struja naše crtnje tjerala bi pol *S* natrag, za ravninu crtnje; u protivnom smjeru tjera pol žicu, t. j. naprijed pred ravninu crtnje.

Sila, kojom magnetsko polje djeluje na struju, može se lako pokazati, ako je vodič struje gibak, na pr. viseća nit lamete, koja nije napeta. — Ako se magnet primakne električnoj lučnici, luk se izobliči, pa ako se time odviše produži, utrne (treba motriti kroz crno staklo ili projicirati).

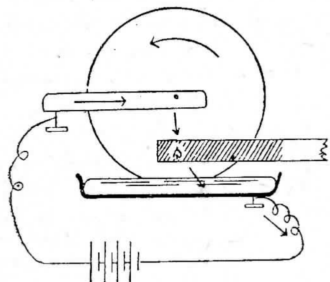
Ako se magnet približi žarulji, koja sja, nit se pomakne; osobito se to primjećuje, kad je nit od ugljena, jer ta nit nije razapeta; ako je žarulja usjana izmjeničnom strujom, nit će utjecajem magneta titrati, te je vidimo kao svjetlu plohu; jer smjer se sile okrene, kad se okrene smjer struje. — Kod pravljenja umjetnog gnojiva iz uzduha stalo je do toga, da uzduh, što se duva kroz električni luk, bude samo kratko vrijeme izložen visokoj temperaturi; u tu se svrhu električni luk izvodi izmjeničnom strujom, a magnetskim se poljem jakoga elektromagneta baca gore dolje, te se na oko rastegne u veliku sjajnu ploču. (Birkeland i Eyde 1903.)

Magnetsko polje *H* ersteda djeluje na žicu dugu *ab* cm, ako kroz nju teče struja jakosti *i* el.-magn. c-g-s—jed., silom

$$p = H \cdot ab \cdot i \cdot \sin\varphi \text{ din},$$

gdje je φ kut, što ga čini smjer žice sa smjerom polja. Ako je $\varphi = 90^0$ ta je sila najveća, $p = H \cdot ab \cdot i$; ako je $\varphi = 0$, sila je $p = 0$.

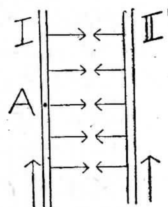
Ima sprava, kod kojih se djelovanjem magneta na struju izvodi trajna vrtnja. Kotač Barlowov (1822.) može se vrtjeti oko horizontalne osi, koja je spojena s jednim polom baterije (sl. 231.); kotač je od bakra, a donji mu rub ulazi u živu spojenu s drugim polom baterije. Od osi teče struja ponajpače kroz donji dio kotača u živu, a kako je taj dio među polovima magneta, magnetsko polje djeluje na struju, te se kotač vrti. — Prve sprave, u kojima radi struje nastaje vrtnja, sastavio je Faraday (1821.); one su najstariji primjer elektromotora; u njima se električna energija pretvara u mehaničnu.



Sl. 231.

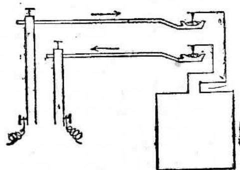
Zad. **158.** Neka se ispita smjer vrtnje u sl. 231.

199. Djelovanje struje na struju. Magnetsko polje, što djeluje na vodič, kojim teče električna struja, ne treba baš potjecati od magneta; ono može da je i samo pobuđeno nekom električnom strujom. Odatle izlazi, da električna struja djeluje na električnu struju. Ampère je našao matematske zakone toga djelovanja (1820.). Spomenut ćemo samo, što je najjednostavnije i najznatnije. Usporednim žicama I i II (sl. 232.) neka teku struje smjerom strelica; struja žice II prema Ampèreovu pravilu izvodi u točki *A* žice I magnetsko polje, koje je upereno naprijed; to polje djeluje na struju žice I silom okomitom na polje i na žicu i to nadesno (kako izlazi iz razmatranja predašnjega §); struja II privlači dakle struju I.

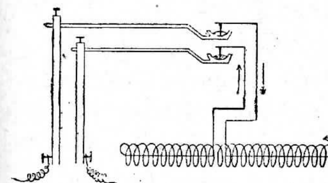


Sl. 232.

To se pokazuje Ampèreovim stalkom (sl. 233.). S polovima baterije spojene su dvije zdjelice, u kojima je čista živa; zdjelice su jedna povrh druge. Aluminijeva žica sa šiljatim krajevima svinuta je u okvir, a okvir može tako visjeti, da u svaku zdjelicu uroni po jedan kraj njegov. Kroz živu se onda dovodi električna struja, a okvir se može vrtjeti oko vertikalne osi. Ako se vertikalnoj stranici okvira približi vertikalna žica, kojom teče električna struja, primjećuje se privlačenje, ako struje imadu iste smjerove, a odbijanje, ako su smjerovi struja protivni. — Ako je struja u okviru dosta jaka, okvir se pod utjecajem magnetskoga polja zemaljskoga namješta tako, da mu je ravnina okomita na magnetski meridijan. Sa slabijom se strujom sličan pokus izvodi, ako se okvir nadomjesti solenoidom, t. j. čvrstom uzvojnicom od žice (σωλήν, *žlijeb, cijev*) (sl. 234.); ako se kroz solenoid pusti električna struja, os se njegova postavi u magnetski meridijan.



Sl. 233.

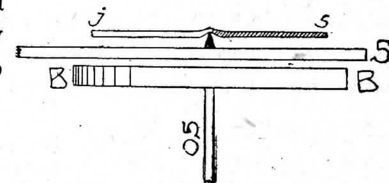


Sl. 234.

Približimo li pomičnom solenoidu drugi, koji držimo u ruci, a solenoidima teku struje, nastat će mehaničko djelovanje kao između dva magneta.

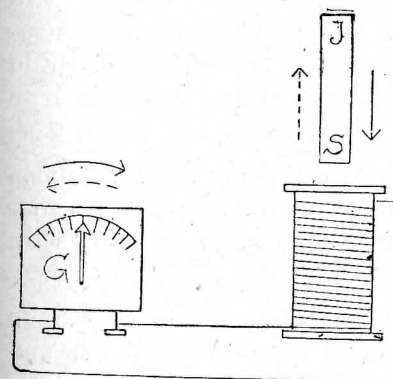
Na tim se činjenicama osniva Ampèreova teorija magnetizma. Po toj teoriji elementarni magnet nije drugo nego čestica, kojom bez prestanka kruži električna struja.

200. Inducirane struje. Ako se horizontalna bakrena ploča *BB* vrti oko vertikalne osi (sl. 235.), vrtjet će se istim smjerom i deklinatorna igla *sj*, što se nalazi iznad ploče (Arago 1824.). Da ne bi vjetar kretao iglu, nalazi se između ploče i igle široka staklena ploča *S*, koja služi i kao podloga za iglu. Taj je pojav protumačio Faraday, kad je (1831.) otkrio inducirane električne struje.



Sl. 235.

Ako se krajevi uzvojnice sastave sa stegačama galvanometra s pokretnim okvirom (sl. 236.), pa se u uzvojnicu gurne magnetski štap *SJ*, kazaljka galvanometra pokazuje kratkotrajnu električnu struju. U vodiču nastaje struja, ako se u blizini vodiča pomiče magnet; ta se struja zove inducirana (lat. *induco, uvodim*); možemo je pripisati osobitoj induciranoj elektromotornoj sili. Za tu elektromotornu silu treba pomišljati, da joj je sijelo u svima točkama vodiča. — Pomakne li se magnet obrnutim smjerom, bit će i udarac struje obrnut. Tako isto su različiti smjerovi inducirane struje prema tome, da li sjeverni ili južni kraj magneta ide naprijed. Pokus pokazuje, da pojav inducirane struje zavisi samo o relativnom gibanju vodiča i magneta, pa je pri tome svejedno, da li miruje vodič ili magnet. — Inducirana će elektromotorna sila prestati, kad prestane gibanje, kojim se pobudila.



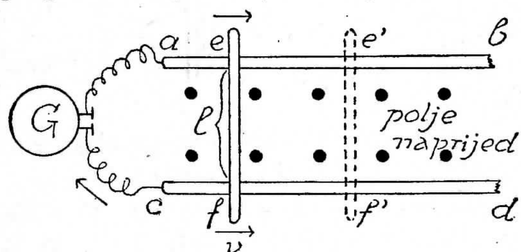
Sl. 236.

U opisanim pokusima pomišljamo magnet dosta jak, a uzvojnica ima oveći broj uzvoja, što pojačava učinak, te galvanometar ne treba da baš bude osobito osjetljiv. S osjetljivim se galvanometrom može pokazati ovaj pokus: raširivši ruke razapnimo odulji komad žice okomito na silnice zemaljskoga magnetskoga polja; ako žicu pomaknemo smjerom, koji je okomit na silnice i na smjer žice, galvanometar, s kojim su krajevi žice spojeni, pokazat će induciranu struju.

Pokus sa bakrenom pločom objašnjava se time, što se ploča giblje u blizini magnetne igle, pa u ploči nastanu inducirane struje, a te struje izvode na magnetnu iglu mehaničku silu. Ploča je bakrena, da bude otpor malen. — Struje u ploči teku zatvorenim krivuljama, što podsjeća na strujanje vode u vrtlogu; zato se takve inducirane struje zovu vrtložne struje.

Inducirane su struje od nedogledne naučne i praktične važnosti, pa nam valja njihove zakone pobliže upoznati.

201. Lenzovo pravilo. Smjer se inducirane struje određuje Lenzovim pravilom (1834.): smjer je inducirane struje takav, da struja nastoji spriječiti gibanje, poradi kojega je nastala. U jednomjernom magnetskom polju neka se duž dvije usporedne debele bakrene pruge *ab* i *cd* (sl. 237.) skliže poprijeċna, na njima okomita pruga *ef*; smjer magnetskoga polja neka je okomit na ravnini pruga (to je polje u slici predočeno točkama [malenim krugovima]). Krajevi *a* i *c* sastavljeni su žicom kroz galvanometar *G*. Inducirana struja ugrijeva žicu, pa se toplina dobiva na trošak radnje, što je vršimo pomičući vodič *ef*. Otuda, što treba vršiti radnju, slijedi, da se neka sila opire gibanju. Ako je magnetsko polje upereno naprijed, a inducirana struja teče od *e* prema *f*, polje djeluje na struju silom, koja ide na lijevo; struja toga smjera nastat će dakle onda, ako se pruga pomiče na desno.



Sl. 237.

Određivanju smjera služi i pravilo desne ruke. Ako neprisiljeno ispružimo 1. *palac desne ruke* u smjer *g*ibanja vodiča, 2. *kažiprst* u smjer *p*olja, onda 3. *srednji prst* pokazuje smjer inducirane *s*truje (početna slova *g*, *p*, *s* slijede alfabetskim redom!).

Ako među polovima nepobuđenoga elektromagneta zavrtimo bakrenu ploču i onda magnet pobudimo, ploča se smjesta zaustavi. — Ako se magnetna igla njiše tik iznad bakrene ploče, brzo se umiri. Inducirane se struje primjenjuju, da spriječe njihanje kazaljke u mjeraćim spravama.

Zad. 159. Kojim će smjerom teći inducirana struja u uzvojnici sl. 236., kad se magnet približuje? (primijenite ili Lenzovo i Ampèreovo pravilo ili pravilo desne ruke).

202. Veličina inducirane elektromotorne sile. U primjeru predočenom u sl. 237. neka se pruga *ef* skliže brzinom v cm/sek, dužina pruge od jednoga do drugoga dotačišta neka je l cm, jakost polja H ersteda, jakost

inducirane struje i el.-magn. c-g-s—jed. $= 10\,i$ ampera. Polje onda djeluje na struju silom $H \cdot l \cdot i$ dina (§ 198.); budući da se pruga u t sek pomakne za $v \cdot t$ cm, treba u to vrijeme izvršiti radnju $Hli \cdot vt$ erga. Ako je x volta inducirana elektromotorna sila, jakost struje $10\,i$ ampera, nastat će u t sek toplina $x \,.\, 10\,i \cdot t$ džula $= x \,.\, 10\,i \cdot t \,.\, 10^7$ erga. Budući da toplina potječe od radnje, izlazi

$$10^8\,xit = Hlivt, \text{ dakle}$$

$$x = 10^{-8} \,.\, Hlv \text{ volta.}$$

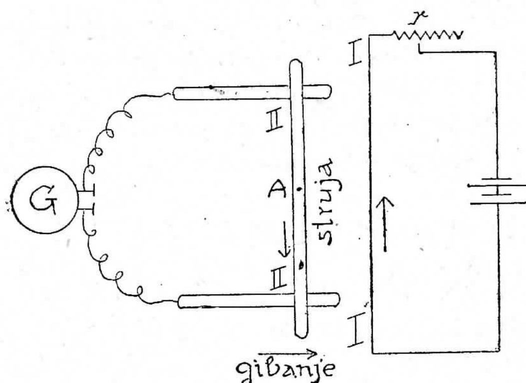
U našem je primjeru prema tome inducirana elektromotorna sila to veća, što je polje jače, što je dulji vodič, koji se giblje, i što mu je veća brzina. Ako se magnetsko polje predoči silnicama, kojih je gustoća odabrana razmjerno jakosti polja, može se rezultat izreći i ovako: inducirana je elektromotorna sila razmjerna broju magnetskih silnica, što ih vodič prereže u 1 sek (Faraday). Dade se pokazati, da to vrijedi uopće, kojigod bili smjerovi vodiča, njegova gibanja i polja magnetskoga. Ako bi se primjer sl. 237. preinačio, te bi polje ležalo u ravnini crtnje, ne bi pruga *ef* rezala silnica, pa ne bi nastala inducirana struja; kad bi tko tvrdio, da ima struja, ne bi joj mogao pokazati izvora, jer bi radnja bila $= 0$ (zašto?).

Ako magnetsko polje nije ravnomjerno, a vodič ima kojigod oblik, treba vodič u misli rastaviti u mnogo komadića i za svaki komadić odrediti induciranu elektromotornu silu, pa dobivene vrijednosti uzete s valjanim prednacima zbrojiti. — Ako se okvir od žice položi na stol i pomiče tako, da ostane u ravnini stola, zemaljski magnetizam ne će pobuditi u žici struje; sada naime rezanjem toliko silnica ulazi u okvir, koliko ih izlazi; prema tome elektromotorne sile jednoga smjera drže ravnotežu elektromotornim silama protivnoga smjera.

S induciranim se elektromotornim silama računa kao i sa elektromotornom silom članka.

Zad. 160. Kolika je jakost struje u primjeru sl. 237., ako je $H = 0{\cdot}2$ ersteda, $l = 1$ m $v = 1$ m/sek, a otpor je žice i galvanometra 10 oma? [2 mikroampera]

203. Sekundarne inducirane struje. Budući da električna struja stvara magnetsko polje, nastat će u drugom vodiču, koji se pomiče u tom polju, inducirane elektromotorne sile. Ravni komad žice II II (sl. 238.) neka je dio zatvorenoga kruga vodiča, u koji je uklopljen galvanometar *G*. Žica II II neka se približuje usporednoj žici I I, kojom teče struja iz baterije. Ta se struja zove „primarna", a iducirana „sekundarna". Primjenom Ampèreova



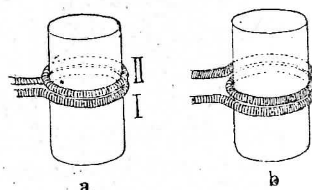
Sl. 238.

pravila dobiva se smjer polja u točki A sekundarne struje, primjenom pravila desne ruke slijedi smjer te struje. Izlazi (kako?), da kod približavanja sekundarna struja ima smjer protivan smjeru primarne struje, a kod udaljivanja obje su struje istoga smjera. — I taj pojav stoji samo do r e l a t i v n e brzine vodiča.

Ako vodiči m i r u j u, a primarna se struja pojača (umanjivanjem otpora r), polje se njezino u točki A pojačalo, a to vrijedi toliko kao da se žica II II približila; nastaje dakle inducirana struja smjera protivna smjeru primarne. Obratno je kod oslabljivanja primarne struje. — Slično vrijedi za najbrže jačanje ili slabljenje struje, naime sklapanje i prekidanje.

Ako je i u tok sekundarne struje uklopljena baterija, treba induciranu elekromotornu silu s valjanim predznakom pribrojiti elektromotornoj sili baterije.

204. Samoindukcija. Ako se u uzvoju I pojačava struja (sl. 239. a), u bližnjem se usporednom uzvoju II inducira struja protivnoga smjera. Ako se oba uzvoja spoje uzastopce (sl. 239. b), opet će kod porasta struje svaki uzvoj inducirati u drugome elektromotornu silu, pa te sile djeluju protiv pojačanja struje, te se njima jačanje struje z a t e ž e. — Indukcija, što je dijelovi nekoga kruga struje izvode jedan na drugi, zove se s a m o i n d u k c i j a. Zbog samoindukcije usporuje se i oslabljivanje struje. Samoindukcija osobito je znatna kod elektromagneta, slabija kod uzvojnica bez željeza a neznatna kod rastegnutih krugova struje. Ona nalikuje mehaničkoj ustrajnosti, jer kako se brzina tijela može mijenjati samo p o s t e p e n o, tako se ni jakost struje ne mijenja skokom.

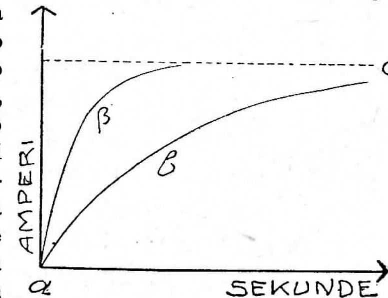


Sl. 239.

Ako se iz galvanskoga članka pušta struja kroz elektromagnet, kojemu je otpor na pr. 1 om, a drugi put kroz rastegnutu žicu, kojoj je otpor isto tolik, struje su jednake; no u prvom će primjeru struja kod sklapanja sporije narasti (jakost struje predočena krivuljom abc, sl. 240.) negoli u drugom (krivulja $a\beta c$).

Sličnosti između struje i gibanja:

1. Iz baterije teče struja s t a l n e jakosti, jer je tjera e l e k t r o m o t o r n a s i l a, a vodič stavlja o t p o r; kap kiše pada j e d n o l i k o, jer je vuče s i l a t e ž e, a uzduh se gibanju o p i r e. — 2. Kad se struja baterije sklopi, ona postepeno naraste do konačne stalne vrijednosti; lako tijelo s početka pada ubrzano, najposlije mu je brzina stalna. Ako je otpor vodiča neznatan, a samoindukcija velika, struja isprva raste j e d n o l i k o u b r z a n o, kako i kamen prosto padajući isprva pada jednoliko ubrzano. — 3. Ako je električni otpor = 0, a nema elektromotorne sile, može teći stalna struja; ako nema trenja, a na tijelo ne djeluje mehanička sila, tijelo se može gibati jednoliko. U pokusima O n n e sovima (§ 186) u olovnom se svitku vanredno niske temperature pobudila (časovitom indukcijom) električna struja; struja je bez elektromotorne sile gotovo neoslabljena tekla dugo vremena, te joj se u 1 satu jakost umanjila za manje negoli 1%.



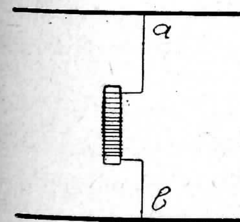
Sl. 240.

205. Koeficijent samoindukcije. Veličina samoindukcije može se brojem izraziti. Ako struja u malenom vremenu Δt sek naraste za Δi ampera, omjer $\Delta i/\Delta t$ mjeri b r z i n u p o r a s t a s t r u j e. Što je veća ta brzina, to će veća biti elektromotorna sila samoindukcije E. U formuli bilježi se to ovako:

$$E = L \cdot \Delta i/\Delta t.$$

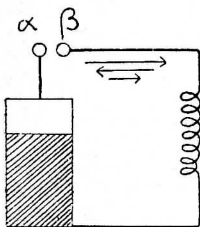
Faktor L za različite je vodiče različit; on se zove k o e f i c i j e n t s a m o i n d u k c i j e. — Ako u vremenu $\Delta t = 1$ sek struja naraste za $\Delta i = 1$ amper, a pri tome se samoindukcijom pobudi elektromotorna sila $E = 1$ volt, izlazi prema formuli, da je koeficijent samoindukcije $L = 1$; ta se jedinica koeficijenta samoindukcije zove 1 h e n r i.

Ako vodič ab (Sl. 241.), kojemu je otpor r oma, a koeficijent samoindukcije L henria, nadovežemo na vodove s napetošću $V_a - V_b$ jakost se struje prema Ohmovu zakonu izračunava tako, da dijelimo $V_a - V_b - L \times \Delta i/\Delta t$ sa r. Poimence nas zanima primjer, kad je otpor vodiča vrlo neznatan, $r = 0$, a L veliko; struja će sporo rasti prema krajnjoj vrijednosti, bit će dakle i dividend naše diobe malen; prema tome je $V_a - V_b = L \cdot \Delta i/\Delta t$, t. j. elektromotorna će sila samoindukcije u svaki čas stajati u ravnoteži s napetošću vodova. — Možemo sada odrediti e n e r g i j u m a g n e t s k o g a p o l j a s t r u j e. U vremenu Δt sek napetost $V_a - V_b$ šalje u vodič energiju $(V_a - V_b) \cdot i \cdot \Delta t$ džula; kako je otpor vodiča neznatan, ta se energija nije potrošila na toplinu; ona se troši na s t v a r a n j e m a g n e t s k o g a p o l j a. Do časa, kad je struja narasla na vrijednost I ampera, magnetsko je polje naraslo do energije $\Sigma[(V_a - V_b) \cdot i \cdot \Delta t] = \Sigma[L\, \Delta i/\Delta t \cdot i \cdot \Delta t] = L \cdot \Sigma[i \cdot \Delta i$ Zbroj Σ mnogih sitnih pribrojnika može se odrediti geometrijskim načinom onako, kako se našla (§ 167.) energija električnoga naboja; izlazi, da je energija magnetskoga polja struje $= {}^1/_2\, LI^2$ (džul, henri, amper). Taj je izraz nalik na izraz za kinetičku energiju ${}^1/_2\, mv^2$.



Sl. 241.

206. Električni titraji. Neka se lajdenska boca izbija kroz iskrište $\alpha\beta$ i žicu malenoga otpora (sl. 242.); napetost između unutarnjega i izvanjega obloga boce neka je isprva pozitivna. Ona šalje najprije slabu, zatim sve jaču struju kroz žicu; naboj se boce umanjuje, pa i napetost postane manja; kad se sav naboj boce izgubio, napetost je 0, a struja je dotle dosegla najveću vrijednost. Radi samoindukcije struja teče i dalje, te se boca nanovo nabije, ali s obrnutim predznakom; napetost sada ustavlja tok struje, dok se najposlije napetost ne popne do najveće negativne vrijednosti, a jakost struje spadne na 0. Onda igra započne iznova, te struja opet počinje rasti, ali u protivnom smjeru negoli prije. Taj se pojav zove električno titranje ili električne oscilacije (lat. *oscillo, njišem*); vrijeme T sek od časa najveće pozitivne napetosti do slijedećega takvoga časa zove se vrijeme titraja. Da ima električnog titranja, upoznao je J. Henry (1842.), matematski ga je ispitao W. Thomson (1853.), a pokusom pokazao tek Feddersen (1857.).



Sl. 242.

Ako je L henria koeficijent samoindukcije spojnoga kruga, C farada kapacitet lajdenske boce ili drugoga kondenzatora, vrijeme je titraja (Thomsonova formula!)

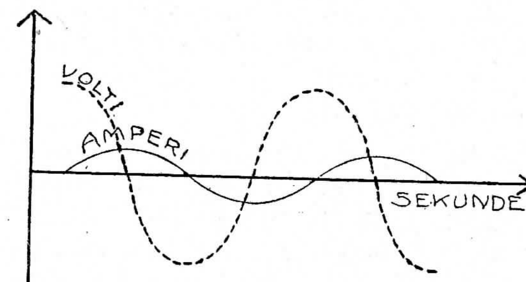
$$T = 2\pi \sqrt{LC} \text{ sek.}$$

Feddersen je iskrište s pomoću zrcala projicirao i sliku iskrišta neposredno motrio ili fotografirao; zrcalo se brzo vrtjelo oko osi usporedne sa smjerom iskrišta, te se slika iskre morala rastegnuti; slika je „jedne" iskre isprekidana, jer se iskra utrne, kadgod jakost struje spadne na vrijednost 0. Vrijeme je T obično vrlo maleno, kad ga isporedimo s 1 sek. — Kako se njihalo poradi trenja najposlije primiri, tako se i električni titraji postepeno uguše. Glavni je tome razlog, što se spojni krug poradi svoga otpora izmjeničnom strujom titraja ugrije.

207. Izmjenične struje. U §§ 190. i 160. spomenuto je, kako se mjeri srednja jakost izmjenične struje i srednja izmjenična napetost; o opažanju časovitih vrijednosti v. § 224. Nauk o izmjeničnoj struji uči, kako se dade računom odrediti jakost izmjenične struje, ako je poznata napetost.

I) Ako se na vodove izmjenične napetosti nadoveže vodič velikog koeficijenta samoindukcije L, a neznatnog otpora, elektromotorna

je sila samoindukcije vazda u ravnoteži s napetošću vodova (§ 205.): $L\Delta i/\Delta t = V_a - V_b$. Kad je dakle napetost $V_a - V_b = 0$, brzina je mijenjanja struje $\Delta i/\Delta t$ također $= 0$; no kako je brzina mijenjanja neke veličine $= 0$ u čas, kad je ta veličina najveća ili najmanja, izlazi, da je jakost struje (apsolutno) najveća, kad je napetost $= 0$. U slici je 243. napetost predočena valovitom crtkanom krivuljom, jakost struje izvučenom krivuljom; struja je „u fazi pomaknuta" spram napetosti za četvrtinu vremena titraja; nije teško pokazati, da struja za napetošću zaostaje. — Ako je L veliko, bit će vrijednosti $\Delta i/\Delta t$ prema gornjoj jednadžbi poprijeko malene, jakost se struje sporo mijenja od 0 prema skrajnjim vrijednostima, dakle su i skrajnje vrijednosti neznatne, pa i srednja jakost malena. Kažemo, da je zbog velike samoindukcije „prividni otpor" ili impedancija (lat. *impedio, sprečavam*) velik. — Prividni bi otpor i onda narastao, kad bi središnjica povećala frekvenciju, t. j. broj titraja, što ih struja izvodi u 1 sek; napetost onda u kraćem vremenu spadne od najveće vrijednosti do 0, pa struja nema kada da naraste do onolike vrijednosti kao kod manje frekvencije.

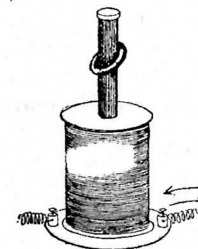


Sl. 243.

U otpornicima, koji služe kod mjerenja, žica je smotana dvostruko ili „bifilarno" (lat. *bis, dvaput; filum, nit*), kako pokazuje sl. 211.; onda nema prividnog otpora. (Zašto?)

Kad teče izmjenična struja vodičem velike samoindukcije, a otpor je neznatan, vodič se ne ugrijeva. Prema tome ne troši se ni energija; doduše kroz vrijeme jedne četvrtine titraja ulazi u vodič energija i stvara magnetsko polje, no u slijedećoj četvrtini magnetsko se polje razara i vraća svoju energiju vodovima (pomaže središnjici u podavanju struje). Na tom se svojstvu osniva primjena ugušivača; to je vodič velike samoindukcije, te služi oslabljivanju izmjenične struje bez traćenja energije.

Pomakom faze tumači se pokus E. Thomsona (1889.). Donji dio vertikalnoga snopa željeznih šibaka okružen je uzvojnicom, kojom teče izmjenična struja (sl. 244.); prsten od aluminija ili bakra nataknut preko snopa lebdi nad uzvojnicom. Tumačenje: izmjenična struja uzvojnice inducira u prstenu izmjeničnu elektromotornu silu, a ova uzrokuje izmjeničnu struju; no struja je u fazi pomaknuta spram elektromotorne sile za četvrtinu titraja, a elektromotorna je sila u fazi za jednak iznos pomaknuta

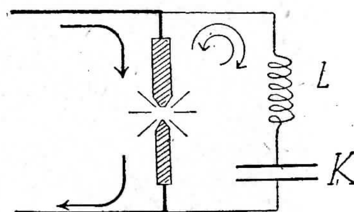

Sl. 244.

spram struje uzvojnice (zašto?), tako da je struja prstena u svemu za pol titraja pomaknuta spram struje uzvojnice; one su dakle vazda jedna drugoj suprotne, te se odbijaju. — Kad se struja uzvojnice brzo sklopi, prsten poleti nekoliko metara visoko.

II) Ako se oblozi kondenzatora žicama sastave jedan s jednim, drugi s drugim vodom izmjenične napetosti, kondenzator se izmjenice nabija i izbija; žicama teče izmjenična struja. Kraj dane izmjenične napetosti ta je struja to jača, što je veći kapacitet kondenzatora (zašto?) i što je veća frekvencija (zašto?). Prema tome je prividni otpor kondenzatora to veći, što su manji kapacitet i frekvencija. — Vodič velike samoindnkcije priječi prolaženje izmjenične struje, a stalnu popušta; kondenzator velikog kapaciteta tako reći propušta izmjeničnu struju, a stalnu ustavlja.

III) Kad izmjenična struja teče vodičem neznatne samoindukcije, struja se u fazi podudara s napetošću; kad je napetost najveća, i jakost je struje najveća; kad je napetost 0, jakost je struje 0. Primjer: žarulja kod obične frekvencije (50 titraja u sek).

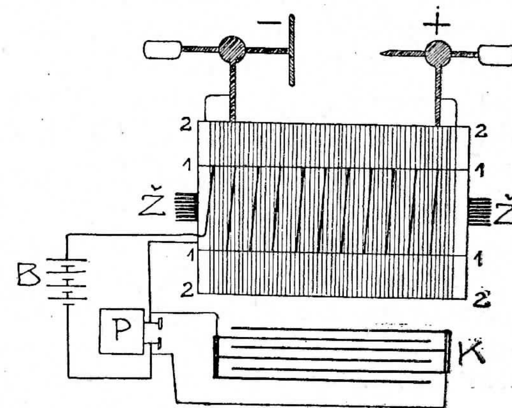
208. Pjevajući plamen. Neoslabljeni električni titraji nastaju kod lučnice, koja „pjeva" (Duddell 1900.). Iz baterije akumulatora teče stalna struja kroz lučnicu (sl. 245.); uporedo lučnici uklopljena je grana, koja sadrži kondenzator *K* i nekoliko uzvoja žice *L*. Kondenzator priječi, te ne može stalna struja teći kroz granu, no sami od sebe nastaju u krugu, što ga čini grana sa lučnicom, električni titraji. Struja tih titraja dodaje se stalnoj struji lučnice, te u njoj struja pravilno i brzo raste i opada; tim se temperatura luka mijenja i okolišni uzduh steže i rasteže, pa nastane ton. Mijenja li se kapacitet kondenzatora ili samoindukcija vodiča (umećući željezo u uzvoje), mijenja se i visina tona. — Na taj je pojav navelo iskustvo, jer se u prvi mah i ne vidi razlog, zašto bi nastalo titranje. Slično je, kad se gudalom izvodi titranje žice; ni tu nije odmah jasno, zašto gudalo ne pridrži žicu u nekom stalnom slomljenom položaju, već izazivlje titranje.



Sl. 245.

209. Induktor. Induktor je sprava, kojom se dobivaju velike električne napetosti (na pr. mnogo tisuća volta) od malenih na pr. od napetosti galvanskih članaka. — Oko željezne „jezgre" ŽŽ (sl. 245.) namotana je „primarna" uzvojnica 11 11 od nekoliko uzvoja debele bakrene žice; kroz nju se iz baterije *B* pušta struja, koja se osobitim prekidačem *P* pravilno prekida i sklapa. Oko primarne namotana je „sekundarna" uzvojnica 22 22, koja sastoji iz mnogo uzvoja žice, a

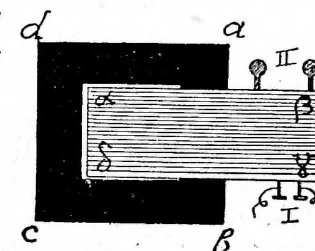
između krajeva te uzvojnice — induktorovih „polova" — mogu preskakivati iskre. Kadgod se prekine primarna struja, nastaje u svakom uzvoju sekundarne uzvojnice indukcijom elektromotorna sila; sve se elektromotorne sile zbrajaju i tjeraju elektricitet prema polovima, te napetost među polovima toliko naraste, da može i iskra preskočiti. — I kad se sklopi struja, nastaje sekundarna struja, i to protivnog smjera negoli kod prekidanja, no napetosti su sada manje, jer se primarna struja kod sklapanja sporije mijenja. — Pozitivan zove se onaj pol induktora, koji ima u času prekida primarne struje veći potencijal.



Sl. 246.

Kod malenih induktora služi prekidač Wagnerov, inače se upotrebljavaju prekidači, koji su udešeni za što brže prekidanje jakih struja (na pr. Teslini prekidači); većinom se zajedno s prekidačem uzimlje i kondenzator *K*, jer se pokazalo, da se time brzina prekidanja struje znatno poveća. Maleni su induktori s prekidačem i kondenzatorom sastavljeni u jednu spravu. — Željezna jezgra pojačava indukciju; ta je jezgra složena iz mnogo izoliranih šibaka (da se spriječe vrtložne struje). — Induktor izumio je Ruhmkorff (1850.), kondenzator dodao je Fizeau (1853.). Još prije toga načinjene su za fiziološke pokuse t. zv. saonice (E. du Bois Reymond 1846.), koje služe i u liječenju („faradajizacija"); nalik su induktoru, no nemaju kondenzatora, a obično ni željezne jezgre, pa je i sekundarna napetost manja; ime im je otuda, što je jedna uzvojnica na pomičnoj podlozi, te se može sklizanjem udaljiti od druge.

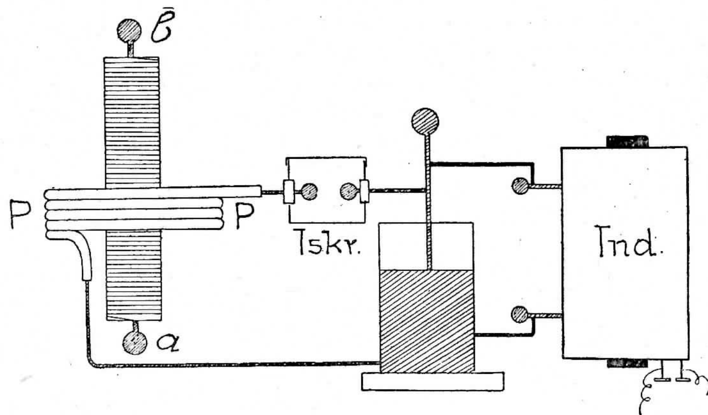
210. Transformator. Induktoru je srodan transformator (lat. *transformo, mijenjam oblik*); zadaća mu je, da izmjeničnu struju velike jakosti i malene napetosti nadomjesti strujom male jakosti i velike napetosti, ili obratno. Jedna se struja I pušta kroz primarnu uzvojnicu, druga II crpe se iz sekundarne uzvojnice. Za razliku od induktora željezna je jezgra ovdje svinuta u potpun „krug". U sl. 247. *abcd* znači okvir sastavljen od željeznih ploča, $\alpha\beta\gamma\delta$ obje uzvojnice nataknute preko jednoga kraka okvira. Magnetske crte ne idu sada kroz uzduh, te svaki uzvoj obuhvata približno jednako mnogo tih crta; elektromotorna je sila za sve uzvoje jedne uzvojnice jednaka, pa nema suvišnih uzvoja, dakle ni nepotrebnoga stvaranja topline.



Sl. 247.

Transformator je poglavito znatan za štedljivo prenošenje energije u velike daljine; na postaji, gdje se struja proizvodi, transformira se ona u struju manje jakosti a veće napetosti (na pr. mnogo tisuća volta); onda se vodi uz neznatno traćenje energije (§ 189.) u drugu postaju, gdje se opet transformira u neopasnu struju male napetosti (Gaulard i Gibbs 1880.). — Kod električnoga se varenja kovina izvode visoke temperature strujom vanredne jakosti (nekoliko tisuća ampera), a ta se struja dobiva transformacijom od struje male jakosti (E. Thomson 1867.).

211. Tesline struje. Osobita svojstva pokazuju izmjenične struje Tesline (Tesla 1891.); to su struje osobito „visoke“ frekvencije (vrijeme titraja iznosi na pr. samo 0·000001 sek) i osobito velike napetosti (stotine tisuća volta). Visoka se frekvencija dobiva tako, da se struje izvode izbijanjem lajdenske boce; u tu su svrhu oblozi izolirane lajdenske boce sastavljeni jedan s jednim, drugi s drugim polom induktora (sl. 248.); a boca se može izbiti kroz iskrište i kroz primarnu uzvojnicu *PP* „Teslina“ tansformatora; ta uzvojnica ima samo nekoliko uzvoja. Kadgod se induktorom boca dovoljno nabije, preskoči iskra, dakle brzi niz električnih titraja prođe kroz primarnu uzvojnicu transformatora. Sred primarne nalazi se sekundarna uzvojnica *ab*; kako je broj njezinih uzvoja velik, nastaje između polova te



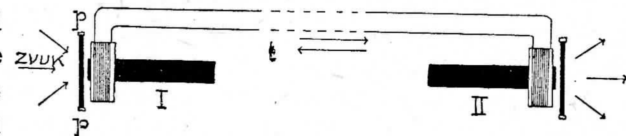
Sl. 248.

uzvojnice izmjenična napetost mnogo puta veća od napetosti lajdenske boce. — Tesline struje pokazuju raznovrsnih osobina. Ako je jedan pol sekundarne uzvojnice odveden zemlji, vidi se u tmini, kako iz drugoga pola izlazi širok, modrikast pramen svjetlosti. Ako se dvije izolirane, velike, usporedne kovne ploče sastave jedna s jednim, druga s drugim polom, svjetlit će među pločama cijevi s razređenim plinovima i onda, ako nisu vodičima spojene s pločama, a i onda, ako nemaju elektroda — Prije se mislilo, da je izmjenična struja čovjeku to opasnija, što veća je napetost i frekvencija;

no iz polova sekundarne uzvojnice Teslina transformatora mogu se začudo struje puštati kroz tijelo, a da ne osjećamo drugo osim topline; tumači se to time, što te struje zbog nagloga mijenjanja smjera ne mogu unatoč velike napetosti izvesti elektrolize, koliko je nužno, da se podraže živci. (Toplina se Teslinih struja upotrebljava u liječništvu; „termopenetracija“.)

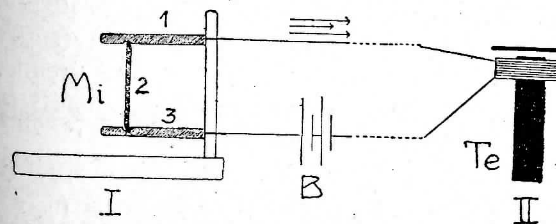
Teslin pokus o impedanciji.

212. Telefon i mikrofon. Telefon služi prenošenju zvuka u velike daljine (φωνή, *glas*). Oko jednoga kraja čeličnoga magneta I (sl. 249.) namotana je uzvojnica bakrene izolirane žice, a od krajeva njezinih vode žice k drugoj postaji, gdje se nadovezuju na jednaku spravu. Pred omotanim krajem nalazi se pločica *pp* od mekoga željeza, koja je na rubu učvršćena. Kad govorimo, titra uzduh, pa i pločica; ona se savija prema magnetu i elastičnom silom opet vraća u svoj položaj ravnoteže; pomicanjem pločice mijenja se i razmještaj magnetskih silnica, pa se pri tome silnicama presijecaju uzvoji žice; nastaju dakle inducirane struje sad jednoga sad drugoga smjera. Struje teku u spravu na drugoj postaji, te joj magnet jačaju i slabe; taj magnet svoju pločicu privlači ili otpušta, te i ta pločica titra i u titranju oponaša titranje pločice prve postaje. Titranje se pločice prenosi na uzduh, gdje nastanu valovi zvuka slični valovima, što su udarili na pločicu prve postaje. (Bell 1876.)



Sl. 249.

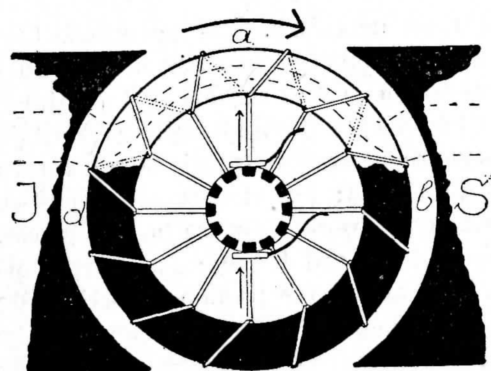
Obično telefon služi samo na postaji, gdje slušamo, a govori se u mikrofon (Berliner 1877. i drugi). Kad se govori u telefon, energija struje potječe samo od energije valova zvuka, pa je time ograničena. Kod mikrofona upotrebljava se energija galvanske baterije, a valovi zvuka vrše samo tu zadaću, da tom energijom upravljaju. Jedan oblik mikrofona *Mi* prikazan je u sl. 250. Struja iz baterije *B* prolazi dotačištima komadića ugljena (ugljenovih štapića 1, 2, 3). Uzdrma li se mikrofon govorom, električni se otpor dotačišta mijenja, pa se struja jača ili slabi. U krug mikrofona ukopčan je telefon *Te*, u kojem promjene struje izvode zvuk. U praksi upotrebljavani mikrofoni imadu mnogo dotačišta, da bude djelovanje jače i pouzdanije (mikrofon s ugljenovim zrncima!).



Sl. 250.

Telefonske se postaje spajaju posredovanjem telefonskih središnjica. Spojevi se u središnjicama izvode čovječjom rukom, ali ima središnjica, u kojima taj posao izvode duhovito izumljeni sustavi automata (obitelj Strowger 1889.). — Ne valja držati, da je na telefonskoj pruzi u neki čas struja svagdje jednako jaka. Električni učinak treba vremena za širenje, te struja ide s jedne postaje na drugu „valovima". Heaviside je teoretski pokazao (1885.), da se ti valovi najmanje oslabe, ako telefonski vod imade primjerenu samoindukciju. Prema tome je Pupin (1899.) u velike unapredio telefoniju time, što u telefonski vod uklapa u određenim razmacima uzvojnice određene samoindukcije. „Pupinizirane" telefonske pruge prenose govor na tisuće kilometara daleko.

213. Magneto-električni stroj. U magneto-električnom se stroju električna struja dobiva uz pomoć pojava indukcije. Sjeverni i južni pol magneta *S* i *J* (sl. 251.) stoje jedan drugome nasuprot, i tako su udubeni, da ostavljaju među sobom valjkovit prostor. U tom se prostoru oko osi njegove može vrtjeti željezni kolut (šupalj valjak). Magnetsko je polje među polovima kolutom izobličeno; radi velike permeabilnosti željeza magnetske silnice ne idu u šupljinu koluta, već se savijaju kroz željezo njegovo (dvije silnice u sl. prikazane su isprekidano). Oko željeza namotana je izolirana bakrena žica, koja čini neprekinutu uzvojnicu. Kad se kolut vrti, izvanji dijelovi uzvoja presijecaju silnice, pa se u uzvojnici induciraju elektromotorne sile. Te su sile najjače u onim uzvojima, koji su baš blizu sredina polova *b* i *d*, dok kod „neutralnih mjesta" *a* i *c* uzvoji ne sijeku silnica, te se u njima ni ne budi elektromotorna sila. Elektromotorne sile u uzvojima blizu sjevernoga pola nastoje potjerati struju protivnim smjerom negoli elektromotorne sile u uzvojima blizu južnoga pola (smjer se određuje pravilom desne ruke!). Nema li dakle nikakve osobite uredbe, ne će ni struja teći, nego će samo nastati napetost među uzvojima i to najveća među oba uzvoja, što su baš kod neutralnih mjesta.



Sl. 251.

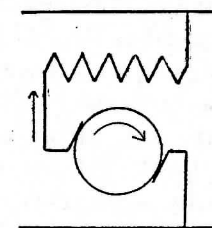
Ako se udesi, da ta dva suprotna uzvoja budu međusobno spojena žicom, spomenuta će napetost kroz žicu slati struju. U tu je svrhu na osi namješten komutator (mijenjač) ili kolektor (sabirač; lat. *commuto, izmjenjujem; colligo, sabiram*); to su izolirane bakrene ili brončane pruge, usporedne s osi, a poređane oko osi u jednakim razmacima. Koliko ima pruga, toliko je na uzvojnici odabrano točaka u jednakim razmacima, pa su redom po jedna točka uzvojnice i jedna pruga žicom spojene. Prugâ se dotiču t. zv. četke; to su vodiči, koji miruju, a dobro su pritisnuti uz kolektor; od jedne četke vodi žica k „pozitivnoj" stezaljci stroja, od druge k „negativnoj". Ako se obje stezaljke sastave žicom izvan stroja, elektromotorne se sile ne će više ugušiti, nego će struje teći objema polovicama uzvojnice suprotnim smjerovima i na neutralnim se mjestima združiti; odanle im je otvoren put kroz četke i stezaljke napolje.

Željezni kolut s uzvojnicom zove se i kotva stroja. Umjesto koluta-kotve danas se češće uzimlje bubanj-kotva; to je željezni valjak, na koji su metnuti uzvoji žice samo s izvanje strane. Zadaća je geometrijska i kombinatorna, da se ti uzvoji tako vode, da se opet može preko kolektora dobiti stalna struja. Prednost je bubnja, što nema žica, koje su suvišne (t. j. žica, u kojima ne nastaje indukcija), te bi svojim otporom samo smetale.

Kao četke upotrebljavali su se svežnji kovnih štapova, dok danas kao četka služi komad ugljena. Četke se i kolektor troše trenjem, a gdjekad i suvišnim iskrama. — Kod strojeva s bubnjem ne može se ići do tolike napetosti kao kod strojeva sa kolutom.

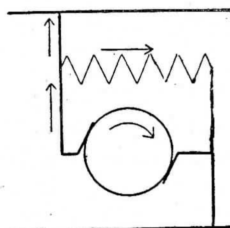
214. Dinamoelektrični stroj. Od magnetoelektričnog stroja mnogo je važniji kao „generator" (lat. *proizvoditelj*) struje dinamoelektrični stroj ili dinamo. U njemu magnetsko polje ne potječe od trajnih magneta već od elektromagneta. Prema izumu, što ga prozvaše „dinamoelektričnim načelom", elektromagneti se dinama pobuđuju strujom, koju sam stroj daje. Remanentni magnetizam elektromagneta dostaje, da se vrtnjom kotve pobudi isprva slaba struja; ta se struja vodi uzvojnicama elektromagneta, te pojačava magnetizam; zbog toga ojačat će struja i to međusobno jačanje struje i magneta ide sve do određene neke granice.

Ako struja iz kolektora ide uzastopce uzvojnicama elektromagneta i kroz sprave, gdje se troši, stroj se zove serijski dinamo (lat. *series, niz*). U sl. 252. predočen je takav dinamo simbolički: krug znači kolektor, tangente su četke, slomljena crta elektromagnet. — Običniji je naporedni dinamo, gdje se struja izašavši iz kolektora razdvaja u granu za elektromagnet i granu za trošenje. (Sl. 253.)


Sl. 252.

Dinamostrojevi grade se i sa više negoli dva magnetska pola; u tom su slučaju magnetski polovi poređani u krug, a redom se izmjenjuju sjeverni i južni pol. Ima dinama, koji daju napetost do 1000 i više volta; ima ih, koji daju struju jaku na tisuće ampera. — Treba primijetiti, da struja iz magnetoelektričnog stroja i dinama nije savršeno stalna; ona se tome približuje to bolje, što je više pruga na kolektoru. — Budući da se u željezu kotve magnetsko polje vrtnjom neprestance mijenja, treba da je kotva sastavljena iz pojedinih ploča, da ne bi nastale vrtložne struje.

Iza Faradayevih otkrića induciranih struja mnogi se trsiše oko izvedbe zgodnoga generatora. Naročito se ističu ovi izumi: Pacinotti je sagradio (1860.) kolut-kotvu sa



Sl. 253.

kolektorom; magneti njegova stroja bili su elektromagneti, a pobuđivali su se strujom iz baterije. Dinamoelektrično načelo nađoše istodobno S i e m e n s (serijski dinamo, 1867.) i W h e a t s t o n e (naporedni dinamo); kotve su njihovih strojeva bile starije nedotjerane vrsti, jer je Pacinottijev izum ostao nepoznat. G r a m m e je kolut-kotvu nanovo izumio i primijenio je u svezi s dinamoelektričnim načelom. H e f n e r-A l t e n e c k zamijenio je kolut bubnjem (1873.).

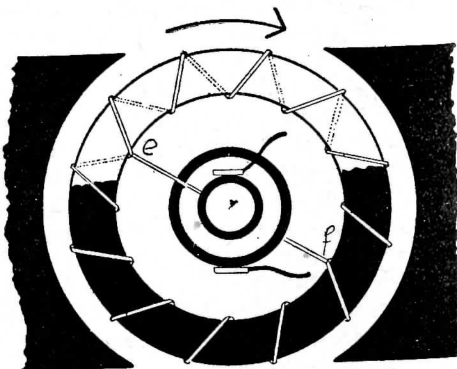
Zad. **161.** Kako se mijenja jakost struje serijskog dinama, ako ga vrtimo jednoliko, a izvanji otpor umanjujemo?

Zad. **162.** Koju vrijednost dobiva jakost struje naporednog dinama, ako izvanji otpor postepeno smanjimo na 0 (kratak spoj među stezaljkama)?

215. Motor za stalnu struju. U generatoru se vrtnjom proizvodi električna struja; iz mehaničke se energije dobiva električna. Generator stalne struje može služiti i kao m o t o r: on se vrti, kad u nj šaljemo struju; iz električne energije dobiva se onda mehanička. — Kad magnetoelektrični stroj daje struju, struja po Lenzovu pravilu nastoji spriječiti kretanje kotve; šalje li se dakle izvana u k o t v u struja takvoga smjera, kakvu bi stroj i sam kao generator davao, nastat će vrtnja, koja je protivna vrtnji stroja uzetog kao generatora. — Motori za stalnu struju mnogo se upotrebljavaju u električnim kolima, gdje izvode vrtnju kotača i time pomiču kola. Struja se obično dovodi iz električne središnjice bilo podzemnim bilo nadzemnim vodovima; no gdjekad električna kola kao izvor struje voze sa sobom akumulatore.

Zad. **163.** Mijenja li se smjer vrtnje a) serijskoga dinama b) naporednoga dinama, ako promijenimo smjer struje, što je izvana u d i n a m o šaljemo?

216. Generator izmjenične struje. U svakom se uzvoju magnetoelektričnoga stroja smjer struje periodično mijenja, jer uzvoj prolazi čas kraj sjevernog čas kraj južnog magnetskog pola. Da se i izvan stroja dobije izmjenična struja, služe kao kolektori dva izolirana, jednaka kovna kolobara, koji jedan za drugim opasuju os (u sl. 254. su kolobari predočeni s dva mala koncentrična kruga). K jednom kolobaru vode žice od točke *e* na uzvojnici koluta-kotve, k drugom na uzvojnici od diametralno suprotne točke kolobaru od diametralno suprotne točke *f*. Svaki se kolobar tare uz jednu čvrstu četku, a od četaka idu žice k stezaljkama. Kad točke *e* i *f* prolaze kraj



Sl. 254.

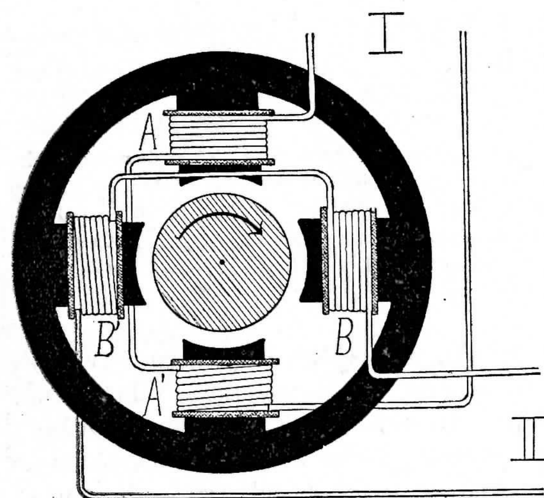
neutralnih mjesta, struja je najjača; kad prsten načini još pô okreta, točke *e* i *f* izmijene položaje, pa će i struja, što teče između *e* i *f* preko kolektora, promijeniti svoj smjer.

V e l i k i generatori izmjenične struje drugačije su građeni. Umjesto dva magnetska pola imadu v i j e n a c od mnogo polova; ti se polovi pobuđuju pomoćnom stalnom strujom dobivenom od akumulatora ili malenog dinama. — Napetost je izmjenične struje redovno velika spram napetosti struje, koja pobuđuje elektromagnete; budući da je lakše provoditi kroz kolektor struju malene napetosti, namjesti se kotva čvrsto (izvana!), a vijenac se polova vrti (iznutra!).

217. Motor za izmjeničnu struju. Generator izmjenične struje sa kolut-kotvom može se izmjeničnom strujom goniti kao motor. Doduše struja ga sama ne će pokrenuti; kako se u kotvi smjer struje brzo mijenja, mijenja se i smjer mehaničkog pokretnog momenta, kojim magnetsko polje djeluje na kotvu, tako da će kotva samo titrati, a ne će nastati vrtnja. No ako se isprva pomoćnim motorom kotva zavrti tolikom brzinom, da uzvoj koluta stigne od jednoga magnetskoga pola drugome za vrijeme polovice titraja struje, pokretni će momenat imati vazda isti smjer i kotva će nastaviti vrtnju pod utjecajem same izmjenične struje. Brzina je vrtnje pri tom motoru u skladu s vremenom titraja; motor se zato zove s i n h r o n m o t o r (grč. σύν, *zajedno*; χρόνος, *vrijeme*). — I serijski dinamo za stalnu struju može uz neke preinake služiti kao motor za izmjeničnu struju (zašto?); taj se motor zove k o m u t a t o r s k i m o t o r. (U slijedećem § upoznat ćemo motor, koji nema komutatora).

Ima primjera, gdje izmjenična struja ne može nadomjestiti stalne (na pr. elektroliza). Da se dobije od izmjenične struje stalna, puštamo izmjeničnu struju da vrti motor, a motor pokreće generator stalne struje. Takav spoj motora i generatora zove se p r e t v a r a č.

218. Dvofazne i trofazne izmjenične struje. Novu je osnovnu misao za konstrukciju električnih motora primijenio T e s l a (od g. 1885. i dalje). Bitno je kod tih motora m a g n e t s k o p o l j e, k o j e s e v r t i; takvo se polje može dobiti sastavljajući polja d v i j u izmjeničnih struja. U motoru sl. 255. 4 unakrst poredana elektromagneta izvode magnetsko polje u sredini motora, i to tako da se dva suprotna magneta u svom djelovanju podupiru. Kroz suprotne elektromagnete *A* i *A'* teče jedna izmjenična struja, kroz suprotne elektromagnete *B* i *B'* druga; vrijeme je titraja za svaku struju jednako, a jedna struja u fazi za drugom zaostaje za $^1/_4$ vremena titraja. Kakvo je polje tih struja u sredini motora, prikazano je u skrižaljci; u prva tri stupca skrižaljke natuknuto je, kako se jakosti struja mijenjaju između najvećih



Sl. 255.

(„maksimum") vrijednosti; struju smjera AA' ili BB' bilježimo s pozitivnim predznakom, struje smjera $A'A$ ili $B'B$ s negativnim; u 4. i 5. stupcu naznačeni su smjerovi polja svake pojedine struje, a u 6. stupcu smjer polja, koje rezultira.

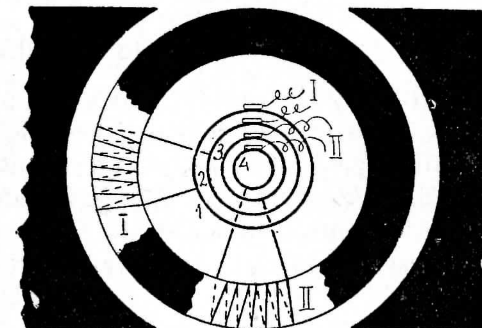
Smjer se polja odredio Ampèreovim pravilom. Iz 6. se stupca razabira, da se magnetsko polje vrti; svakomu titraju struje pripada jedan okret polja.

vrijeme	jakost I. struje	jakost II. struje	smjer polja		
			I. struje	II. struje	sastavljenoga
0	+ maks	0	prema A'	—	prema A'
$^1/_4$ T	0	+ maks	—	prema B'	prema B'
$^2/_4$ T	— maks	0	prema A	—	prema A
$^3/_4$ T	0	— maks	—	prema B	prema B

Ako se oko iste osi kao polje može vrtjeti bakren šupalj valjak, silnice će u vrtnji presijecati bakar i time pobuditi inducirane električne struje u bakru, a magnetsko će polje djelujući na te struje kretati valjak u istom smjeru, u kojem se i samo vrti. Kad valjak ne bi trebao svladavati trenja, a ne bi vršio ni drugu kakvu radnju, vrtio bi se jednoliko bez djelovanja sile; u tom slučaju ne bi smjelo biti induciranih struja, dakle ni presijecanja silnica; valjak bi se prema tome vrtio jednako brzo kao i magnetsko polje. No kako valjak vrši radnju, treba da mu je vrtnja sporija od vrtnje magnetskoga polja. Zato se taj motor zove asinhronmotor (ἀ, grč. niječna čestica). Velika je prednost motora prikazanog u sl. 255., što vodiču, koji se vrti, ne dovodimo struju izvana, te ne treba četaka; struja nastaje u kotvi indukcijom.

Umjesto da se vrtnja magnetskog polja izvodi sa 2 izmjenične struje, običnije se primjenjuju 3 izmjenične struje jednake jakosti i frekvencije;

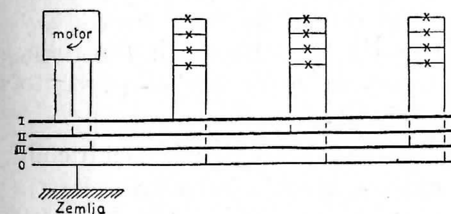
od njih druga zaostaje za prvom za $^1/_3$ titraja, treća za $^2/_3$ titraja. U prvom slučaju govorimo o dvofaznim strujama, u drugom o trofaznim strujama, a kad želimo osobito istaći, da se služimo jednom jedinom izmjeničnom strujom, zovemo je jednofaznom.



Sl. 256.

Za dovođenje trofaznih struja ne treba 6 žica, kako bi se u prvi mah mislilo; već je Tesla našao, da dostaju 3 žice.— 2 ili 3 struje, što trebaju za proizvođenje vrtnje magnetskoga polja, stvaraju se u jednom generatoru. Da je to moguće, vidi se iz sl. 256., gdje je predočena kolut-kotva, oko koje su omotane dvije uzvojnice I i II razmaknute za 90°; na osi generatora nalaze se jedan za drugim 4 izolirana jednaka bakrena kolobara (u sl. 4 koncentrična kruga); po jedan kolobar i jedan kraj uzvojnice žicom su spojeni; s kolobara odvode se struje kroz 4 četke. U čas, za koji vrijedi crtnja, struja je u uzvojnici I baš najjača, u uzvojnici II = 0. Izilaze dakle dvofazne struje. — Dvofazne struje mogu nastati i iz jednofaznih; ako se izmjenična struja razgranjuje, a u jednu je granu uklopljen vodič s velikim koeficijentom samoindukcije, struja u toj grani u fazi zaostaje. Primjena kod Ferrarisovih mjeraćih sprava (služe samo kod izmjenične struje!); primjena kod indukcionog motora za jednofaznu struju.

Mnoge munjare proizvode trofazne struje, koje teku trošiocima uličnim kabelima sastavljenima od četiri žice, koje su jedna od druge izolirane. Tri su žice deblje i zovu se fazni vodiči (Sl. 257., I, II, III), dok je četvrta tanja i zove se nul-vodič; nul-vodič je spojen sa zemljom. Motori priključuju se na sva tri fazna vodiča, za rasvjetu pako uvode u stanove samo po dvije žice, koje se odvajaju jedna od nul-vodiča, druga od jednog faznog vodiča. Priključci su tako porazdijeljeni, da su fazni vodiči ojednako opterećeni strujom; za taj se slučaj može pokazati, da kroz nul-vodič ili ne teče struja ili je struja u njemu slaba (i = *nula*), tako da se u tom vodiču, kakogod je tanak, ipak ne trati mnogo energije. (§ 189.).



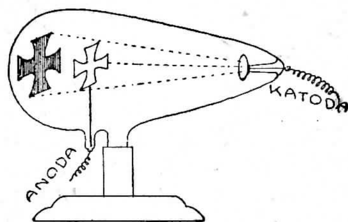
Sl. 257.

Takvo vođenje struje jeftinije je negoli jednofazna struja. Evo zašto! Nul-vodič je tanak, te je malene cijene, pa se može u prvi mah uzeti kao da ga nema. Kad bi sada trošioci prve faze prekinuli svezu s drugom i trećom fazom, trebalo bi za te trošioce osim njihova faznoga vodiča namjestiti još jednu jednako debelu žicu, jer jednofazna struja treba dva vodiča. Time bi se podvostručio električki otpor, pa bi se i traćenje energije podvostručilo. Da se to spriječi, treba prorez žica podvostručiti, da otpor spadne na vrijednost, što je ima otpor prvog faznog vodiča kod trofaznog razdjeljivanja struje. Kod jednofazne struje treba dakle vodič dvostruke dužine i dvostrukoga proreza, tako da je cijena upotrebljenoga bakra u svemu četverostruka. Uostalom budući da i nul-vodič imade debljinu razlika je u cijeni ipak nešto manja.

Neka je spomenuto, da se u tom razmatranju uzelo, da u oba primjera, što ih ispoređujemo, dajemo trošiocima jednaku napetost — na pr. 220 volta — t. j. najveću napetost, koja se bez veće opasnosti može u stanovima primijeniti.

6. Atomi i njihova građa

219. Katodne zrake. Ako je tlak plina u staklenoj cijevi s elektrodama malen — na pr. 0·01 mm — i elektrode stavimo pod veliku napetost (stroj na influenciju, induktor), staklo će nasuprot katodi „fluorescirati" t. j. svjetliti, i ako je hladno. Ako je između katode i onoga dijela stakla, što svjetli, krut predmet, na staklu se pojavi sjena predmeta (sl. 258.). Ti pojavi nastaju od katodnih zraka. Katodne zrake pobuđuju svu silu tvari na svjetljenje; iz katode izilaze otprilike okomito na njezinu površinu; ako je katoda konkavna, tako da se zrake sastanu u jednoj točki, mogu usjati predmet, koji je u toj točki namješten. Ako katodnim zrakama sa strane približimo magnet, put im se savija (sjene se pomiču) i to u smjeru, koji je okomit na magnetskom polju i okomit na zrakama (djelovanje magnetskog polja na struju!). Da su katodne zrake struja negativnog elektriciteta, vidi se po tom, što ih negativno nabit vodič u cijevi odbija, a i po tom, što donose predmetima, na koje udare, negativni naboj. — Što je rjeđi plin u cijevi, to veća treba da bude električna napetost, da se dobiju katodne zrake: ako je tlak 0·01 mm, elektricitet će prolaziti kroz cijev već uz manji broj volta, negoli kad je tlak samo 0·001 mm. Katodne su zrake ispitali poglavito Hittorf (1869.) i Crookes. „Crookesove cijevi".

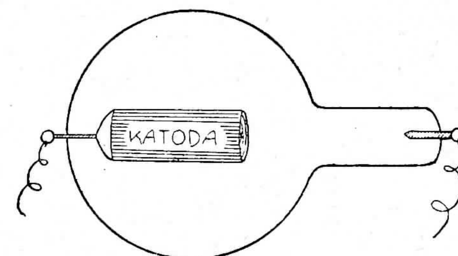


Sl. 258.

Ustalilo se uvjerenje, da su katodne zrake roj negativnih električnih čestica (Crookes 1874.). O mehanizmu njihova gibanja valja ovo držati. Brzina je čestica to veća, što veća napetost treba za pogon cijevi, jer je uz veliku napetost električno polje u cijevi jako i daje česticama velike brzine. Što se pak tiče savijanja katodnih zraka utjecajem magnetskoga polja, ono je uz velike napetosti slabije, što je i razumljivo, jer kad se čestice brzo giblju, teško se skreću iz svog smjera gibanja. Koliko je savijanje puta neke električne čestice, stoji uostalom ne samo do brzine već i do mase i naboja čestice: većoj se masi put teže savija, a na jače elektriziranu česticu magnetsko bi polje jače djelovalo, te bi joj se put jače savijao. Međutim se našlo, da je kraj dane napetosti i zadane jakosti magnetskoga polja savijanje jednako veliko, bila katoda od kojegod tvari i kojigod se plin u cijevi nalazio. Otuda se zaključilo, da čestice katodnih zraka nisu raznovrsne, te nisu elektrizirani odlomci katode, a ni čestice plina, već vazda neke osobite

čestice iste vrsti. Na osnovu mjerenja savijanja moglo se izračunati, kolik je specifični naboj takve čestice t. j. omjer njezina naboja e kulona i njezine mase m grama; izlazi $e : m = 1{\cdot}759 \cdot 10^8$. Isporedimo s time podatke dobivene elektrolizom: da se izluči 1 g vodika, treba 95740 kulona; prema tome je omjer između naboja e' iona vodikova i njegove mase m' jednak $e' : m' = 95740$. Ako pretpostavimo, da je naboj iona vodikova (apsolutno) jednak naboju čestice u katodnim zrakama, $e' = e$, slijedi za mase $m' : m = 1{\cdot}759 \cdot 10^8 : 95740 = 1840$. Prema tomu se uzimlje za čestice u katodnim zrakama, da su one najsitnije negativne čestice ili elektroni, a masa elektrona da je neznatna i spram mase najlagljega kemijskoga atoma, atoma vodikova. (J. J. Thomson 1897.) U elektronu ima $4{\cdot}80 \cdot 10^{-10}$ el.-st. c-g-s-jed. elektriciteta (§§ 155., 194.). — Račun, koji daje omjer $e : m$, vodi i do vrijednosti brzine katodnih zraka; ona iznosi kod 10000 volta oko 58000 km/sek (brzina svjetlosti 300000 km/sek).

Kao uzrok katodnih zraka treba uzeti udarce pozitivnih čestica plina, koje utjecajem električnoga polja nalete na katodu i iz nje kanda izbijaju elektrone.

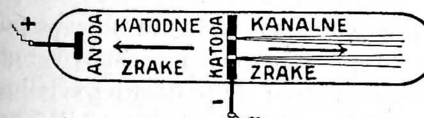


Sl. 259.

Premda je u Crookesovoj cijevi još uvijek silan broj molekula (isp. zad. 101.), ipak joj je vakuum tolik, da molekula može bez sraza poletjeti kroz cijelu cijev (isp. § 101.) S tim je u skladu činjenica, da ne može elektricitet kroz cijev prolaziti, ako je prostor oko katode preuzak. U tom slučaju naime pozitivni ioni, koji bi padajući na katodu imali proizvesti katodne zrake, nisu proletjeli dosta dugačak put, te im kinetička energija nije narasla do vrijednosti, kolika treba za izbijanje elektrona. Cijev prikazana u sl. 259. služi kao električni ventil (isp. § 187.) i to kod velikih napetosti; jedna je elektroda te ventil-cijevi u širokom dijelu cijevi, druga u uskom, pa samo kad je prva elektroda katoda, može elektricitet kroz cijev prolaziti.

Zad. **164.** Iz podataka ovoga § izračunajte masu elektrona u gramima. ($9{\cdot}1 \times 10^{-28}$)

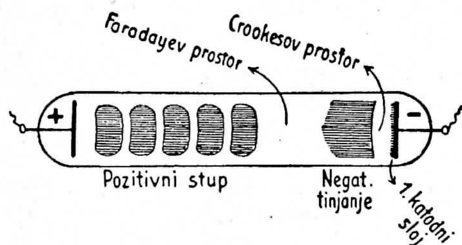
220. Kanalne zrake. Ako je katoda u razrijeđenom plinu prorešetana, idu od katode kroz njezine „kanale" kanalne zrake (sl. 260.); one tvore u plinu svjetle trakove; smjer im je suprotan smjeru katodnih zraka (Goldstein 1886.). Te se zrake samo vrlo jakim magnetskim poljem savijaju, a po smjeru savijanja izlazi, da u njima ima osim pozitivno električnih čestica i negativnih, a ima i neelektričnih, na koje polje uopće ne djeluje. Omjer između naboja i mase različit je, a može se usporediti s vrijednošću toga omjera



Sl. 260.

kod elektrolitičnih iona; otuda se zaključuje, da su kanalne zrake struja tvarnih atoma ili atomskih skupina. Drži se, da čestice kanalnih zraka isprva sve imadu pozitivan naboj i lete pod utjecajem električnoga polja sve većim brzinama od anode prema katodi; prošavši kroz rupice katodine dolaze u prostor, gdje nema električnoga polja, pa u tom prostoru ustrajnošću nastavljaju svoj put.

221. Geisslerove cijevi. Prostor, u kojemu je razrijeđen plin, lako propušta elektricitet i pri tome svjetli. To se pokazuje Geisslerovim cijevima (izumio ih je Gassiot 1854., a vješto pravio Geissler); plin je zatvoren u staklenu cijev (sl. 261.), koja ima na krajevima utaljene kovne elektrode; elektrode sastavljamo s konduktorima električnoga stroja ili s polovima induktora. Jakost i boja svjetlosti zavise o vrsti plina, tlaku plina i t. d. Dok još razređenje nije veliko (tlak na pr. 1 ili 2 mm), opažamo od anode do katode redom: dugački „pozitivni stup svjetlosti", „Faradayev tamni prostor" i „negativno tinjanje".



Sl. 261.

Kod većih se razređenja primjećuje između negativnog tinjanja i katode još: „Crookesov tamni prostor" i „prvi katodni svijetleći sloj"; osim toga se često pozitivni stup raspane u čudno pravilne „slojeve". S razrjeđivanjem Crookesov se prostor i negativno tinjanje šire, dok tinjanje ne stigne do anode. Najposlije preostane samo još Crookesov prostor, te plin više ne svjetli, tako da je od Geisslerove cijevi postala Crookesova cijev. — Koliko su ti pojavi objašnjeni, tumače se gibanjem elektrona i iona.

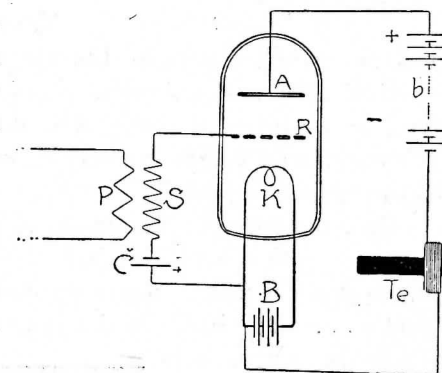
Kao slab izvor svjetlosti — na pr. $^1/_3$ svijeće — služi lampa tinjalica. Katoda joj je od željeza, a punjena je plinom neonom, kojemu je tlak malne 10 mm; uz taj izbor tvari struja prolazi već kraj malih napetosti, na pr. 110 volta. Svjetlost potječe od negativnog tinjanja, koje pokriva katodu. Izvanji je oblik lampe kao u obične žarulje. (Schröter 1919.)

222. Polarna svjetlost. Pojavi polarne svjetlosti javljaju se na prostranim dijelovima neba u raznoličnim i nestalnim oblicima; često ih viđaju u polarnim krajevima, rijetko kada u nas; mjesta, gdje su najčešći, ispunjaju dva eliptična prstena, što okružuju sjeverni i južni magnetski pol zemaljski. Na fotografijama snimljenima istodobno s različitih mjesta polarna je svjetlost različito namještena spram zvijezda; na osnovu toga namještaja dade se izračunati visina svjetlosti; izlazi da je polarna svjetlost pojav, koji se zbiva u našoj atmosferi u visini od 100 km i više (čak i 750 km visoko). Kako su viši slojevi uzduha rijetki, mogu u njima nastati pojavi kao u Geisslerovim cijevima; a budući da je utvrđena sveza između po-

larne svjetlosti i pojava na Suncu (isp. konac § 139.), uzimamo, da polarna svjetlost nastaje time, što rojevi električnih čestica došavši od Sunca ulete u našu atmosferu.

223. Elektroni užarenih vodiča; elektronska cijev. Ima pojava, koji pokazuju, da užareni vodiči emitiraju elektrone. Poradi toga se u razrijeđenima plinovima mogu katodne zrake proizvoditi sa neznatnim napetostima, ako je katoda užarena. Onda ne treba pozitivnih iona, da nastane električno izbijanje; razrjeđenje može dakle biti makar najveće. Praktički se danas tim pojavom obilno služe kod t. zv. elektronske cijevi (de Forest 1906.), koja služi za pojačanje telefonskih struja, u radiotelegrafiji i u druge svrhe.

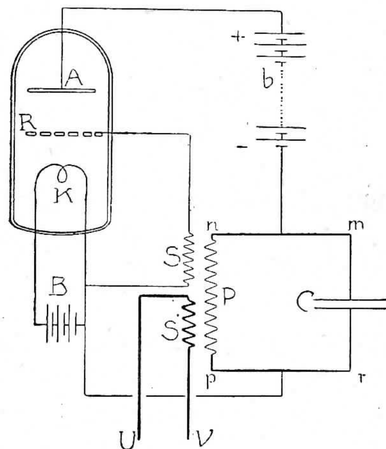
Elektronska cijev obično imade tri elektrode: 1 užarenu žicu kao katodu; 2. anodu; 3. među katodom i anodom prorešetanu ili kako drukčije isprekidanu elektrodu, koja se zove rešetka. U sl. 262. prikazana je elektronska cijev uobičajenim shematičkim načinom. Katoda *K* užaruje se „strujom grijalicom" dovedenom dvjema žicama iz „baterije za ugrijevanje" *B* (na pr. 6 volta). Jedna od dovodnih žica produžena vodi do negativnoga pola „anodne baterije" *b* (s ovećom napetošću, na pr. 100 volta), kojoj je pozitivni pol spojen s anodom. Užarena katoda emitira elektrone, koji kroz rešetku *R* lete prema anodi *A* i time upravo čine anodnu struju. Ako se rešetka čas manje čas više negativno električki nabije, onda će odbojnošću čas slabije čas jače ustavljati elektrone i time mijenjati jakost struje. Malene promjene napetosti, koja vlada između katode i rešetke, mogu onda uzrokovati znatne promjene anodne struje.



Sl. 262.

Za pojačanje telefonskih struja može elektronska cijev poslužiti evo ovako. Struje, što dođu iz mikrofona prve stanice, ne puštaju se u drugoj stanici odmah u telefon, već u primarnu uzvojnicu *P* transformatora; sekundarna uzvojnica *S* uklopljena je u „krug rešetke", koji sadrži još i članak *Č*; taj bi članak sam za se podijelio rešetki stalnu negativnu napetost spram katode. Toj se napetosti pribraja promjenljiva napetost, što nastaje u uzvojnici *S* indukcijom od primarne struje dovedene iz prve stanice. Promjene su anodne struje onda u skladu s promjenama primarne struje, samo su od njih jače, pa se tekar ta anodna struja vodi kroz telefon *Te*. —

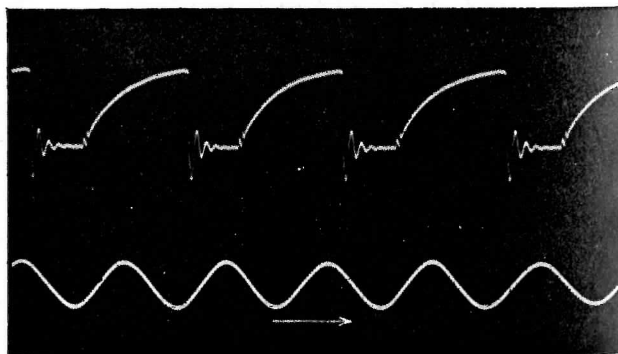
Može se udesiti, da se umjesto jedne elektronske cijevi uzme njih nekoliko. U tom se slučaju anodna struja prve cijevi pojačava u drugoj cijevi, anodna struja druge cijevi pojača u trećoj i t. d., pa se dobije do neke granice sve veće pojačanje.



Sl. 263.

Ovećom se elektronskom cijevi mogu proizvoditi električne oscilacije, koje se odlikuju osobitom stalnošću vremena titranja. U krug anodne struje elektronske cijevi uklapa se u tu svrhu zaseban oscilatorni krug *mnpr* (sl. 263.), koji je sastavljen iz kondenzatora *C* i uzvojnice *P*. Potonjemu krugu pripada određen broj titraja (kao i oscilatornom krugu u sl. 242.). Sklapanje kruga anodne struje dostatan je povod, da se u krugu *mnpr* pobude oscilacije. Transformacijom se onda iz uzvojnice *P* kao primarne uzvojnice prenese titranje na sekundarnu uzvojnicu *S*, koja spaja katodu *K* elektronske cijevi sa rešetkom *R*. Time se upravlja jakost anodne struje, te njezino kolebanje čini, da se titraji u krugu *mnpr* ne uguše. Da uzmognemo titraje upotrebiti u vodu *UV*, približit ćemo uzvojnicu *S'* toga voda uzvojnici *P*.

224. Oscilograf; Braunova cijev. Oscilograf je sprava, kojom se u tančine ispituju brze promjene električne struje. Taj aparat stvara automatično grafički prikaz struje na fotografskoj ploči (apscise . . . sekunde, ordinate . . . amperi). Tako donji oscilogram u sl. 264.[1]) prikazuje, kako se mijenja struja, koja teče iz električke centrale kroz običan otpornik (apscise u smjeru strelice!). Krivulja je sinusoida; da nastane jedan brijeg i jedan dol krivulje. treba da prođe 0·02 sek, (jer je frekvencija 50 u sek.) Na istoj slici gornja je krivulja oscilogram primarne struje induktora. Ona je snimljena drugim oscilografom u isto vrijeme kada i donja krivulja. Lijepo se vidi,

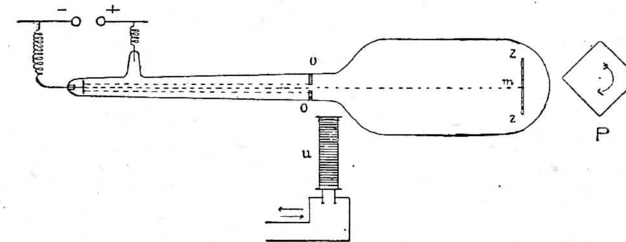


Sl. 264.

[1]) Snimio: Katalinić

kako primarna struja induktora, kada se sklopi, raste postepeno (§ 204.) i kako brzo kod prekida spadne na jakost 0; kod toga pada struje svjetlost se tako brzo pomiče na fotografskoj ploči, da joj je trag jedva primjetljiv. Izmjerivanjem obaju oscilograma izlazi, da se kod induktora primarna struja prekidala 33 put u sekundi.

Takvi se oscilogrami mogu dobiti s pomoću Braunove cijevi (Braun 1897.). To je dugačka Crookesova cijev osobita oblika (sl. 265.); u njoj katodne zrake prošavši uskim otvorom u stijeni *oo* udare na prozračan zastor *zz*, na kojem načine malenu svjetlu mrlju *m*. Ispitivana se struja pušta kroz uzvojnicu *u*, koja je postavljena okomito na smjer zraka; magnetsko polje struje otklanja zrake, a kako se struja mijenja, otklon je čas veći čas manji; svijetla se mrlja time razvuče u svjetao pravac. Ako tu crtu motrimo u zrcalu, koje se vrti oko osi usporedne sa crtom, razvuče se crta u krivulju. (Umjesto jednoga zrcala obično se uzimlje prizma *P* složena od više njih.) Ta krivulja prikazuje zakon struje. Oscilogram se dobije na taj način, da se svjetli pravac fotografira i pri tom fotografska ploča jednolično giblje smjerom, koji je na pravac okomit.

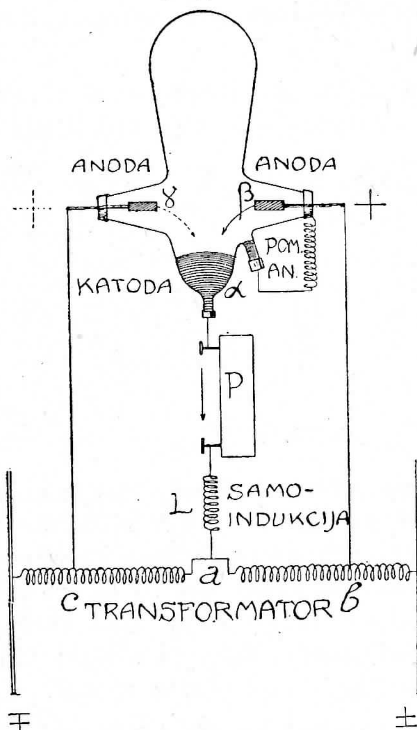


Sl. 265.

Za pogon Braunove cijevi treba velika napetost, koja je stalna (dakle ne induktor!). Radi toga i iz drugih razloga mnogo više se upotrebljava preinačena Braunova cijev, kojoj se katoda užaruje, a i inače je zamršenije građena.

225. Ispravljači s užarenom katodom. Emisijom elektrona iz užarenog vodiča tumači se činjenica, da električni luk ne može postojati, ako negativna elektroda nema dosta visoke temperature; struja elektrona, koja je zacijelo ovdje nužna, ne može kod niske temperature iz elektrode izilaziti. Da se to pokaže, načinimo električni luk između čvrstoga komada ugljena i ruba ugljenove ploče, koja se može vrtjeti; ako je ploča negativna, luk će utrnuti, kad ploču zavrtimo; kod obrnutih polova vrtnja ne će uništiti luka. — To se svojstvo luka upotrebljava kod ispravljača sa živinim parama (Cooper Hewitt 1902.), kojim se od izmjenične struje dobiva valovita, a služi kod nabijanja akumulatora i t. d. U staklenoj zataljenoj

posudi osobita oblika (sl. 266.) nalazi se samo živa; malen je dio posude ispunjen tekućom živom α, koja služi kao katoda živinu luku; sa strane nalaze se dvije(!) anode β i γ. Na gornjoj se strani posuda nastavlja u oveći prostor, u kojem se živine pare ohlađuju i kondenziraju, tako da temperatura posude ne naraste preko mjere. Izmjenična se struja dovodi u zgodan transformator („samotransformator"), kojemu je sredina *a* spojena sa katodom, a simetrično izabrane točke *b* i *c* s anodama. U spoj α *a* uklopljen je vodič velike samoindukcije *L* i sprava *P*, u kojoj trošimo valovitu struju. — Ako se pobrinemo, da bar na čas dio površine žive bude užaren, pa ako je u taj čas potencijal *b* veći negoli kod *a*, nastat će električni luk živinih para između β i α; premda je napetost između elektroda β i γ još veća, ne može nastati luk $\beta\gamma$, jer γ nije užareno, te ne može postati katodom. Malo kasnije predznak se izmjenične napetosti promijeni, pa će nastali luk od γ prema α. Struja dakle teče čas putom $b\beta\alpha a$ čas putom $c\gamma\alpha a$, te je na putu αa njezin smjer vazda isti. Vodič *L* samoindukcijom priječi, da ne bi struja prestala, kad napetost između *b* i *c* postane = 0; u tom bi se slučaju katoda toliko ohladila, da ne bi više mogao nastati luk. („Pomoćna anoda" služi samo prvom užarivanju žive.)



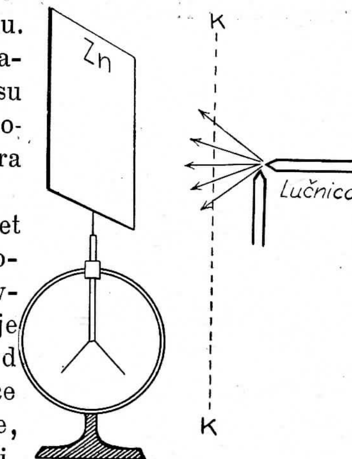
Sl. 266.

Kenotron je elektronska cijev s dvije elektrode; katoda je užarena, a razrjeđenje je najveće. (Κενός, *prazan*; — τρον, grč. nastavak.) Propušta struju samo takvim smjerom, da je užarena elektroda katoda, dok struji protivnog smjera zakrči put i kraj velikih napetosti[1]. — Kao ventil za male napetosti i jake struje (za nabijanje akumulatora!) upotrebljava se tungar. I to je cijev sa dvije elektrode; katoda, koja se i ovdje užaruje, jest od volframa (engl. *tungsten*), a cijev je punjena plinom argonom (tlak 30 do 80 mm). Elektroni što izlete iz katode, ioniziraju plin, pa je struja jaka, jer i dobiveni ioni u njoj sudjeluju.

226. Fotoelektricitet. Na štapić običnoga elektroskopa učvrstimo vertikalnu ploču od tutije *Zn* i namjestimo lučnicu, da svjetli na jednu stranu

ploče (sl. 267.). Stavimo između ploče i luka karton *K*, tako da zrake iz lučnice ne zgađaju ploču, i nabijmo ploču negativno, da se listići elektroskopa razmaknu. Ako uklonimo karton, listići se za nekoliko časaka sklope; zrake električkoga luka uklonile su negativni elektricitet. Ako pokus ponovimo s pozitivnim elektricitetom, naboj se sačuva bez obzira na to, jesmo li karton uklonili ili nismo.

Taj utjecaj „svjetlosti" na elektricitet otkrio je Hallwachs 1888., a zovemo ga fotoelektricitetom. Različno vladanje negativnog i pozitivnoga naboja u tom pojavu ostalo je isprva sasvim neobjašnjeno. Najposlije je Lenard 1899. pokazao, da tu pod utjecajem zrākâ lučnice izlijeću iz vodiča onakve iste negativne čestice, kakve lete u katodnim zrakama, naime elektroni.



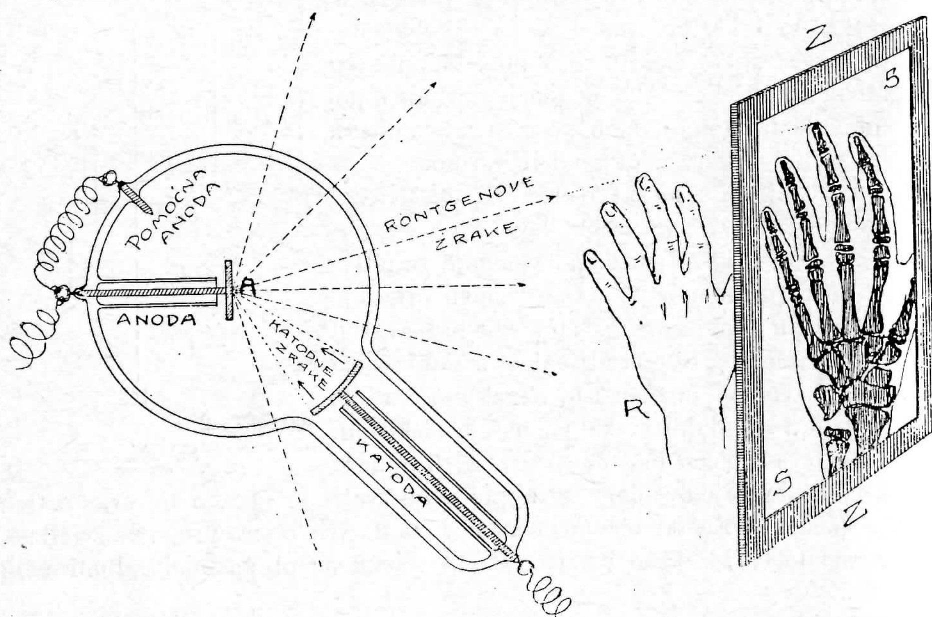
Sl. 267.

Lako se pokazuje, da pojav sa tutijinom pločom nastaje djelovanjem ultraljubičastih zraka lučnice, a ne svjetlosti u užem smislu. Ploča od običnoga stakla, ma da vrlo dobro propušta svjetlost, sprečava pojav baš kao i karton; ona naime ne propušta ultraljubičastih zraka.

Fotoelektricitet pokazuju i drugi vodiči; pojav stoji do vrsti vodiča i do vrsti zraka, koje ga zgađaju. — „Fotoelektrične stanice".

227. Röntgenove zrake. Na mjestu, gdje katodne zrake udare u zapreku, nastaju Röntgenove zrake. (Röntgen 1895.) „Cijev" zgodna za dobivanje tih zraka predočena je u sl. 268., te ima u glavnome oblik kugle. Katoda je konkavna, da se katodne zrake sastanu u jednoj točki *A*; u toj točki udare katodne zrake u anodu [zovu je također antikatodom] od platine, volframa i t. d. i stvaraju Röntgenove zrake, koje se iz spomenute točke šire u prostor. (Anoda je žicom spojena s pomoćnom anodom, koja iz osobita razloga čini cijev trajnijom.) Ako je cijev sasvim zastrta ljepenkom, a u blizini se nalazi zastor namazan platinocijanbarijem $BaPt(CN)_4$ (ili pak vilemitom Zn_2SiO_4), zastor će svjetliti, jer Röntgenove zrake prolaze kroz ljepenku i izazivlju svjetljenje. Opće je poznato njihovo svojstvo, da ih sve tvari propuštaju. One se šire pravcima, a predmeti, kroz koje prodiru, prema većoj ili manjoj prozračnosti bacaju blijeđe ili tamnije „sjene". Opazit ćemo to, ako redom namjestimo cijev, ispitivani predmet *R*, zastor *ZZ* i oko, a pri tom je svjetli sloj *SS* zastora okrenut prema oku. U slici je prikazano, kako na zastoru nastaje Röntgenova slika ruke; u njoj se kosti ističu kao tamnija mjesta, jer kosti slabije propuštaju Röntgenove zrake, nego što ih propušta meso. (Slika je poradi

jasnoće nalijevo shematična, nadesno perspektivna.) Poprijeko vrijedi, da tvari veće gustoće Röntgenove zrake slabije propuštaju; tako ih drvo bolje propušta



Sl. 268.

negoli aluminij, ovaj bolje negoli olovo, meso bolje nego kosti; olovo baš zato služi kao zaštita od Röntgenovih zraka. — Röntgenove zrake djeluju na fotografsku ploču kao i svjetlost, te se „rendgenogram" dobije, ako zastor s platinocijanbarijem zamijenimo fotografskom pločom; ploča pri tome ostaje zatvorena u kutiji, koja je štiti od svjetlosti. Oko neposredno slabo zamjećuje Röntgenove zrake. — Bitno se razlikuju od katodnih zraka time, što ih ni najjače magnetsko polje ne odvraća iz pravčaste staze; od svjetlosti poglavito time, što se ne lome. — Ako izoliran vodič s električnim nabojem izložimo Röntgenovim zrakama, naboj se gubi; Röntgenove naime zrake stvaraju u uzduhu ione („ioniziraju" uzduh) i time ga čine vodičem.

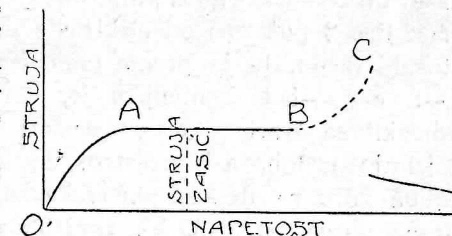
Röntgenove zrake prema podrijetlu svome različito lako prolaze kroz neki predmet. Ako predmet znatno upija zrake, te ih malo propušta, zrake se zovu „mekane"; zrake, koje lako prodiru, zovu se „tvrde". Tvrde se zrake dobivaju, ako je razrjeđenje u cijevi znatno, te treba veliku napetost primijeniti, da nastane izbijanje; katodne su zrake u tom slučaju brze, dakle od brzih katodnih zraka nastaju tvrđe Röntgenove zrake, od sporijih mekanije. U cijevima, kojima se obično pokazuju katodne zrake, razrjeđenje je premaleno, a da bi Röntgenove zrake, što u njima nastaju, mogle prodrijeti kroz

staklo, i tako tih zraka ne možemo opaziti. I za cijevi govorimo, da su tvrde ili mekane, prema tome kakve zrake davaju. Neprilika je, što se razrjeđenje i s time tvrdoća cijevi upotrebom mijenjaju, ali ima raznovrsnih uredbi, kojima se razrjeđenje može regulirati.

Mnogo se upotrebljava cijev, gdje se katoda osobitom strujom užaruje; u toj je cijevi uzduh koliko je god moguće razrijeđen; onda množina elektrona emitiranih iz katode a s time i obilje Röntgenovih zraka zavisi poglavito o temperaturi katode; u drugu pak ruku tvrdoća zavisi samo o napetosti, pa je kod raznih temperatura ista. (Ta cijev nema pomoćne anode.) Coolidge 1913.

Röntgenove su zrake od velike naučne važnosti, a mnogo se praktično primjenjuju, poimence u liječništvu, gdje služe i za diagnozu i za liječenje („rendgenologija"). — Struje za Röntgenove cijevi mogu se crpsti iz induktora, a i iz stroja na influenciju. Napetost, što je daje induktor, kad se njegova primarna struja sklopi, nastoji goniti elektricitet kroz cijev smjerom, koji je za cijev štetan, pa valja tome elektricitetu spriječiti prolaz (na pr. uklapanjem ventil-cijevi, isp. § 219.). Više se upotrebljava transformator, koji od izmjenične napetosti električne središnjice stvara izmjeničnu visoku napetost. Ako se Röntgenove zrake proizvode Coolidgeovom cijevi, sama cijev poput kenotrona (§ 225.) djeluje kao ventil. Gdje u praksi trebamo Röntgenove zrake stalne tvrdoće, uzimlje se uz transformator naročit ispravljač, da se dobije visoka napetost, koja je stalna.

Brzina ioniziranja uzduha mjeri se „strujom zasićenosti". Struja se crpe iz baterije malenih akumulatora i pušta kroz uzduh (u „ionizacionoj komori") i kroz galvanometar. Röntgenovim se zrakama u uzduhu svake sekunde stvara izvjestan broj pozitivnih i negativnih iona, te pomicanje tih iona upravo i čini električnu struju u uzduhu. Dok je broj akumulatora malen, električno je polje u uzduhu slabo, ioni se pomiču sporo, pa se mnogi ion s ionom protivnog predznaka spoji i neutralizira, dakle mu naboj ne ide kroz galvanometar. Tek uz oveći broj akumulatora bit će polje u uzduhu tako jako i brzina iona tako velika, da će naboji svih iona stići u galvanometar. Struja onda iscrpljuje sve ione, što se u uzduhu stvaraju, pa jakost struje ne će narasti, ako i povećavamo elektromotornu silu. Struju onda zovemo strujom zasićenosti. (U sl. 269. sve je to grafički prikazano. Krivulja OA predočuje, kako raste struja, dok su napetosti malene, a pravac AB prikazuje struju zasićenosti.) — Što se više u sekundi stvori iona, to je jača struja zasićenosti, pa nam dakle struja zasićenosti može služiti kao mjera za brzinu ioniziranja.



Sl. 269.

Drugi je način istraživanja, da se kroz uzduh, koji se ionizira, izbija elektrometar, koji je nabit do tolike napetosti, da nastane struja zasićenosti. Što kraće vrijeme treba, da napetost spadne kroz izvjestan razmak vremenosti, to je veća brzina ioniziranja. Ona je obrnuto razmjerna spomenutom vremenu.

(Treba uostalom dodati, da se ipak i struja zasićenosti može nadmašiti. To će onda biti, ako je električno polje osobito jako. Ioni se onda toliko ubrzaju, da udarcima kidaju čestice uzduha i stvaraju nove ione, a s brojem iona raste onda i jakost struje. U sl. 269. krivulja BC!).

*

228. Radioaktivnost. H. Becquerel našao je (1896.), da kemijski element uran i njegovi spojevi emitiraju zrake, koje poput Röntgenovih prolaze kroz mnoge neprozirne tvari, djeluju na fotografsku ploču i ioniziraju uzduh. Jakost tih „Becquerelovih zraka" može se odrediti, ako mjerimo elektroskopom ionizaciju; što brže se gubi električni naboj kroz uzduh obasjan Becquerelovim zrakama, to je veća jakost njihova. P. Curie i Sklodowska-Curie svestrano ispitaše te zrake i otkriše (1898.) u uranovu smolincu kemijski element, koji jakošću svojih zraka nadmašuje uran do miljun puta; prozvaše ga radijem (lat. *radius*, *zraka*), a pojav Becquerelovih zraka radioaktivnošću (lat. *activus*, *djelatan*). Od onoga se doba našla radioaktivnost i u drugih tvari, koje su se baš tek svojom radioaktivnošću nauci objavile, te ih upoznajemo elektroskopom. Ponajviše naime dolaze u tako malenim množinama, da ih nikako ne možemo odvagnuti.

Postoje u bitnosti tri vrsti Becquerelovih zraka; okrstiše ih s pomoću prvih slova grčkog alfabeta alfazrake, betazrake i gamazrake. Prve su „najmekše", te ih već tanki listići zadržavaju, a i u uzduhu običnoga tlaka prevale tek nekoliko cm; gama zrake su „najtvrđe", pa u tom nadmašuju i Röntgenove zrake. Alfazrake magnetskim se poljem slabo savijaju i to kao struja pozitivnog elektriciteta; jače djeluje magnetsko polje na betazrake, a otklanja ih kao struju negativnoga elektriciteta; na gamazrake magnetsko polje ne djeluje. Za alfazrake i betazrake treba uzeti, da su poput kanalnih zraka i katodnih zraka roj čestica, kojima brzine stoje do toga, iz kojega elementa zrake izilaze.

Kod alfačestica svih radioaktivnih tvari jest specifički naboj (§ 219.) isti i to $e:m = 48230$ (kulon: gram) i svaka je alfačestica pozitivno električan atom helijev (isp. § 120.). Alfačestica i ionizirani atom vodikov imadu prema tome specifičke naboje, koji se odnose otprilike kao 2 : 1. Kako mase tih čestica stoje približno u omjeru 4 : 1, izilazi, da je elektricitet alfačestice **2 put** veći od elektriciteta ioniziranog atoma vodikova. To daje i točniji račun, te je prema tome elektricitet alfačestice $2 \times 4{\cdot}80 \times 10^{-10}$ el.-st. c-g-s—jed. Zanimljivo je, da su alfazrake u izvjesnoj daljini od radioaktivne tvari rekbi odsječene; u toj daljini one gube svojstvo, da ioniziraju uzduh, a i svojstvo, da izvode scintilacije (§ 120.). Spomenuta daljina zove se doseg alfazraka, a zavisi o tom, iz koje tvari alfazrake izlaze; doseg zavisi još i o vrsti plina, u kojem se alfazrake giblju, a i o temperaturi i tlaku plina. Kod 15 °C i običnog tlaka doseg je radijevih alfazraka u uzduhu 3·52 cm, dok element radij C′ u jednakim prilikama izbacuje alfazrake sa dosegom 6·94 cm. Međutim — točnije uzeto — treba reći, da su ti brojevi samo srednji brojevi i da je doseg različitih alfačestica izbačenih iz neke radioaktivne tvari samo približno jednak. Iz toga, da je jednak, zaključujemo, da su čestice izletile iz radioaktivne tvari s jednakim brzinama; a što se dužine staza ipak ponešto kolebaju, lako se tumači time, da alfačestica svoju brzinu gubi udarajući u atome, a slijed tih srazova za svaku je česticu drukčiji. — Za betazrake, kojima brzine nisu prevelike, izlazi kao u katodnih zraka omjer $e:m = 1{\cdot}76 \cdot 10^8$ (kulon: gram), pa prema tome držimo, da su betazrake isto što i katodne zrake, t. j. struja elektrona. Betazrake, koje su još brže, pokazuju osobitost, da se masa njihovih čestica očituje različita prema brzini; poraste li brzina betačestice, poveća se i masa. (Kaufmann 1901.; isp. § 57.). U betazrakama elementa RaC („radij C") najbrži elektroni imadu brzinu 297000 km/sek (t. j. 99% brzine, kojom se svjetlost širi u praznom prostoru). Za umjetno proizvođenje takvih brzina (u Crookesovoj cijevi) trebalo bi elektrone goniti napetošću od preko 3 miljuna volta. Masa je elektrona kod te brzine 50 put veća nego li u mirovanju.

Umjetne betazrake. Lenard je vodio katodne zrake iz Crookesove cijevi napolje i to na način, da je u staklo umetnuo „prozorčić" (od tankog aluminija), koji je propuštao katodne zrake; prozorčić bio je sitan, da izdrži izvanji tlak (1892.). Coolidge (1925.) sastavlja mnogo Lenardovih prozorčića u velik prozor (do promjera 8 cm), a katodne zrake dobiva iz užarene katode kao kod cijevi, koju je sagradio za Röntgenove zrake (§ prednji). Time dobiva u uzduhu katodne zrake, koje obiljem svojim daleko nadmašuju betazrake iz bilo koje radioaktivne tvari. Uzduh pred takvom cijevi svjetli još u daljini od pola metra, a golem je učinak tih „umjetnih betazraka" na živu tvar, te na pr. sitnije životinje pogibaju, ako su izložene zrakama makar samo kroz malen dio sekunde.

229. Radioaktivno raspadanje. Uzrok je radioktivnosti raspadanje atoma (Rutherford i Soddy 1903.). Od velike množine atoma radioaktivne tvari sad se jedan sad drugi raspadne u sitnije česti. Atom radija ima atomnu masu 226; kad se on raspadne ili „pogine", nastane atom helija s masom 4 i atom elementa, koji se zove radijeva emanacija ili kraće radon, a masa mu je $222 = 226 - 4$; to je kao neka eksplozija, te novorođeni atomi polete suprotnim smjerovima, laglji s većom brzinom (15000 km/sek), teži s manjom (270 km/sek), tako da su im veličine gibanja jednake ($4 \cdot 15000 = 222 \cdot 270$). Isp. § 28.

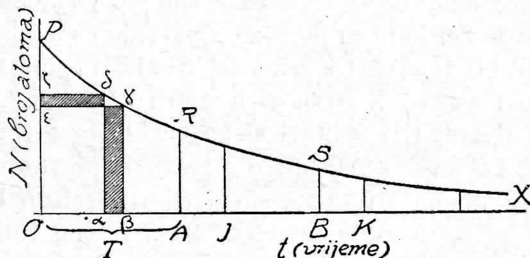
Za raspadanje vrijedi statistički zakon, koji neka bude objašnjen na samom primjeru radija. Od $\tau = 7{\cdot}21 \cdot 10^{10}$ atoma radijevih svake se sekunde raspadne 1 atom; od množine, koja sadržaje $2\,\tau$ atoma, raspast će se u 1 sek 2 atoma, a u masi od N atoma svršit će svoj život svake sekunde $N : \tau$ atoma. U 2 sek nestat će $N/\tau \cdot 2$ atoma, u Δt sek $N/\tau \cdot \Delta t$ atoma. Označi li se porast broja atoma sa ΔN (negativan broj!), dakle smanjenje broja atoma sa $-\Delta N$ (pozitivan broj!) izlazi zakon radioaktivnoga raspadanja

$$-\Delta N = 1/\tau \cdot N \cdot \Delta t$$

ili riječima: broj atoma, što se raspadnu, razmjeran je broju svih atoma i vremenu. Taj zakon vrijedi samo statističkom točnošću;

ako na pr. kažemo, da se u 1 sek raspadnu 3 atoma, prosječni je to broj, koji izlazi kao srednja vrijednost podataka dobivenih u mnogo sekundi.

Zakon raspadanja predočen je krivuljom sl. 270., gdje su apscise vrijednosti vremena t, ordinate vrijednosti broja N atoma, koji su u čas t još preostali. Ako u razmaku vremena T sek $= OA$ broj radijevih atoma spadne na polovicu, u slijedećim će jednakima odsjecima vremena $T = AB = IK = \ldots$ spasti opet svaki puta na polovicu, tako da su ordinate $AR = \frac{1}{2} OP$, $BS = \frac{1}{2} AR$, i t. d. Vidimo, da množina radija opada geometrijskim nizom, ako vrijeme raste aritmetičkim nizom. — Vrijeme T zove se „polovično" vrijeme. Ako je τ poznato, može se T izračunati približno ovako. Budući da se u tom vremenu raspala polovica atoma, treba u zakon raspadanja staviti $\Delta t = T$, $-\Delta N = N/2$. Taj zakon vrijedi za slučaj, da je N približno stalno; kako se pak u našem primjeru taj broj smanjuje od N na $N/2$, uvrstit ćemo za N srednju vrijednost $\frac{1}{2}(N + N/2) = 3\,N/4$. Prema tomu je



Sl. 270.

$$N/2 = 1/\tau \cdot 3\,N/4 \cdot T,$$

iz čega slijedi $T = \frac{2}{3}\tau = 0{\cdot}67\,\tau$. Točnijim računom dobiva se $T = 0{\cdot}6931\,\tau$. Riječima: ako se od τ atoma radioaktivne tvari svake sekunde raspadne 1 atom, smanjit će se množina tvari iza $0{\cdot}6931\,\tau$ sek na polovicu. Kod radija je polovično vrijeme $T = 0{\cdot}6931 \cdot 7{\cdot}21 \cdot 10^{10}$ sek $= 1580$ godina; od 1 g radija preostane iza 1580 godina $\frac{1}{2}$ g.

Da se množina radioaktivne tvari m računom odredi za kojigod čas t, treba znati njezinu množinu M u čas 0. Kako se u polovičnom vremenu T množina smanji na polovicu, imamo

u časovima $\quad t = 0, \quad T, \quad 2T, \quad 3T, \ldots \quad t = kT$
množine $\quad m = M, \; M:2, \; M:2^2, \; M:2^3, \ldots \quad m = M : 2^k$.

Prema tome je

$$m = M : 2^k = M \cdot 2^{-k} = M \cdot 2^{-t : T}$$

(Isp. padanje tlaka uzduha u visini, § 96.)

Od polovičnoga vremena treba razlikovati „srednje trajanje života" atoma. Od neke množine radijevih atoma, koje sada ($t = 0$) imamo pred sobom, neki će se naskoro raspasti, a neki će poživjeti još mnogo tisuća godina; aritmetička sredina svih vremena, što pojedinim atomima preostanu od sada pa do kraja njihova bitka, zove se srednje trajanje života. Srednje trajanje života $= \tau$ sek.

Dokaz: U vremenu $\Delta t = \alpha\beta$ svršilo je svoj vijek $\Delta N = \zeta\varepsilon$ atoma (sl. 270.); od njih je svaki poslije časa $t = 0$ živio još $t = O\alpha$ sek, svi zajedno dakle $\Delta N \cdot t$ sek, pa je zbroj trajanja njihovih života predočen likom $\zeta\varepsilon\gamma\delta = \Delta N \cdot t$. Uzmu li se redom svi dijelovi vremena od časa $t = 0$ do časa $t = \infty$, raspast će se sav radij, pa će dotle ukupno trajanje života svih atoma iznositi $\Sigma(\Delta N \cdot \Delta t)$ sek $= \Sigma\zeta\varepsilon\gamma\delta = OPX$. Da se dobije tražena aritmetička sredina, treba taj izraz podijeliti s brojem svih atoma, što su isprva postojali i raspali se. Kako se u vremenu Δt raspadne $1/\tau \cdot N \cdot \Delta t = 1/\tau\ \alpha\beta\gamma\delta$ atoma, broj je svih atoma $1/\tau\ \Sigma\alpha\beta\gamma\delta = 1/\tau\ OPX$. Dijeljenjem izlazi $OPX : 1/\tau\ OPX = \tau$ sek. — Kod radija je srednje trajanje života $7{\cdot}21 \cdot 10^{10}$ sek $= 2280$ godina. Element mezotorij 1 (rado upotrebljavan poradi jake radioaktivnosti) ima srednje trajanje života 9·7 godina, plin radon 5·55 dana, a ima radioaktivnih elemenata, kojima se ta veličina odredila mnogo manja od 1 sek.

Radon, što nastaje raspadanjem radija sadržanog u krutoj površini zemaljskoj, prelazi u uzduh, pa se i sam raspada. Razumljivo je, da ga u uzduhu imade nad kopnom više nego li nad morem, u visini manje nego li tik površine zemaljske. Osobito obiluje radonom uzduh zemljinih šupljina (na pr. u podrumima).

Znatne se množine radona mogu naći apsorbirane u gdjekojim vodama. Budući da takove vode služe kao lijek, treba znati, kako se množina njihova radona mjeri. U tu se svrhu voda dobro promućka s uzduhom mnogo većega obujma (na pr. 1 litra vode sa 10 litara uzduha), tako da najveći dio radona pređe iz vode u uzduh. (Na pr. kod 20 °C sadržavat će 1 litra uzduha nakon mućkanja 4 puta više radona nego li 1 litra vode.) S pomoću elektrometra se ispita, kojom se brzinom električni naboj gubi kroz obični uzduh, a onda, kojom brzinom kroz uzduh, u koji dovedosmo radona. Što brže se naboj gubi, to je jače ioniziranje, to više dakle ima radona, koji tu ionizaciju izvodi. Sprava, koja služi tima opažanjima, zove se fontaktoskop (lat. *fons, izvor; akto* prema aktivnost).

Vodu s radonom ne valja na dulje vrijeme spremati, jer se njezino djelovanje naskoro oslabi (poluvrijeme radona 3·35 dana).

Rjeđe su vode, koje sadržavaju plin toron ili torijevu emanaciju. Poluvrijeme tog radioaktivnog elementa još je mnogo kraće negoli u radona naime samo 54 sek.

Zad. **165.** Za koliko se % umanji vrijednost radijeva preparata u 10 godina, ako je radijevo polovično vrijeme 1580 godina? [za 0·45%]

Zad. **166.** Supstitucijom $T = 0{\cdot}6931\,\tau$ može se zakon raspadanja prevesti u oblik $m = M\,e^{-t:\tau}$ koliko je e? [2·718, baza prirodnih logaritama]

Zad. **167.** Na kolik se dio smanji množina radioaktivnog elementa u vremenu, koje je jednako srednjemu trajanju života? (isp. pređašnji zadatak!) [na dio 0·37]

Zad. **168.** U 226 g radija (226, atomna masa!) ima $6{\cdot}03 \cdot 10^{23}$ atoma (§ 129.); 1 g radija daje u 1 sek $3{\cdot}71 \cdot 10^{10}$ alfačestica; koliko je τ?

230. Radioaktivna ravnoteža. Radij je potomak radioaktivnog elementa urana. Očituje se to time, što u uranovim rudačama ima vazda i radija. Gdjegod ih crpemo, posvuda na 1 g radija dolazi $3{\cdot}0 \times 10^6$ g urana. Budući da je atomna masa uranova 238, radijeva 226, ima u 1 g urana 226/238puta toliko atoma koliko u 1 g radija; prema tome se svaki atom radija u uranovoj rudači nalazi u društvu sa $226/238 \times 3{\cdot}0 \times 10^6 = 2{\cdot}85 \times 10^6$ atoma uranovih. Što je omjer brojeva atoma kod različitih rudača isti, tumači se ovako. Radij raspada se mnogo brže negoli uran; od miljun atoma radijevih raspast će se u godinu dana više njih negoli od miljun atoma uranovih. Ima li negdje urana bez drugih radioaktivnih primjesa, ne će to tako ostati,

jer odmah započne raspadanje, a u nizu elemenata, koji time nastaju jedan iz drugoga, jest i radij. Isprva će se pojaviti neznatna množina radija; od njega će u godinu dana manje atoma propasti, nego što novih atoma nastane, i množina će radija sve više rasti. To ide dotle, dok ne bude toliko radija, da svake sekunde toliko njegovih atoma pogine, koliko ih se porodi. Onda velimo, da je radij u ravnoteži s uranom; u vremenu Δt raspadne se onda toliko atoma radijevih koliko i atoma uranovih. Ako se od τ atoma uranovih u 1 sek raspadne po 1 atom, a tako isto od τ' atoma radijevih po 1, pa ako uranovih atoma ima N a radijevih N', vrijedi za ravnotežu $1/\tau N \Delta t = 1/\tau' N' \Delta t$ ili $\tau : \tau' = N : N'$. Budući da je $N : N' = 2{\cdot}85 \cdot 10^6$, $\tau' = 7{\cdot}21 \cdot 10^{10}$, izlazi iz netom napisane jednadžbe za uran $\tau = 2{\cdot}85 \times 10^6 \times 7{\cdot}21 \times 10^{10} = 2{\cdot}05 \cdot 10^{17}$. Do istoga se broja dolazi, ako se broje alfačestice (v. § 120.), što ih 1 g urana u 1 sek izbaci. Prema tome je srednje trajanje života uranova $2{\cdot}05 \cdot 10^{17}$ sek $= 6{\cdot}5 \cdot 10^9$ godina.

U nizu atoma, što se raspadanjem pretvaraju jedan u drugi, ima početak i kraj. Tako je u nizu, kojemu pripada radij, početni atom uran; taj atom ima veću masu nego ikoji drugi poznati kemijski atom i zasada se ne zna, otkuda uran; smanjuje li se njegova sveukupna množina u svijetu zbog raspadanja ili se izgubljeni atomi nekako nadomještaju? Kao proizvod raspadanja uranova nastane naposlije olovo (Boltwood 1907.), koje je poput radija i helija uranovim rudačama primiješano. Čini se, da je atom olova stalan, ili mu je raspadanje tako sporo, da se do sada nije moglo opaziti. Izračunalo se, koliko se u godinu dana dobiva olova iz 1 g urana, a na osnovu toga broja može se odrediti starost uranovih rudača; treba s tim brojem podijeliti množinu olova, što je primiješana 1 gramu urana. Računi ove ruke vode do stotinâ miljuna godina, a ima nade, da će se moći spomoću radiaktivnosti starost geoloških doba brojkama izraziti.

Množina radona često se mjeri jedinicom, koja se — prema imenu Curie — zove kiri; 1 kiri jest ona množina radona, koja je u ravnoteži sa 1 g radija.

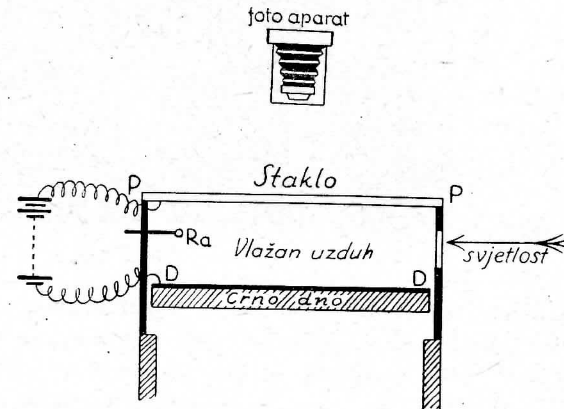
Zad. **169.** Atom radijev izbacivši 1 alfačesticu pretvara se u atom radona; koliko je radona u ravnoteži s 1 g radija, ako je srednje trajanje života za radij $7{\cdot}21 \times 10^{10}$ sek, za radon $4{\cdot}80 \times 10^5$ sek, atomna masa radija 226, radona 222? [0·00654 mg]

Zad. **170.** Odredite na osnovu podataka § 230., koliko atoma imade u 1 kiriu radona [$5{\cdot}55 \times 86400 \times 3{\cdot}71 \times 10^{10}$]

Zad. **171.** 10 sati nakon što je neka voda crpena iz vrela, sadrži ona u 1 litri 0·000001 5 milikiria; koliko je obilje radona u vrelu?

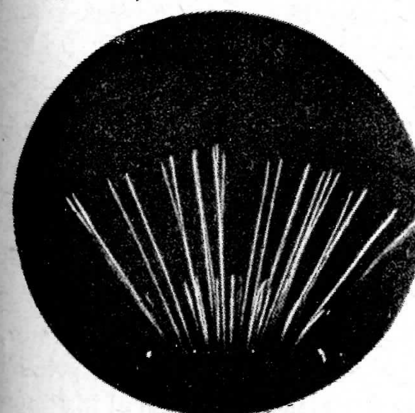
231. Wilsonova komora. Alfačestica — kad leti kroz uzduh — golemom svojom energijom razbija čestice plina u pozitivne i negativne ione, tako da za njom kao trag ostane crta posuta ionima. — Wilson je pokazao (1912.), kako se taj trag može i vidjeti i fotografirati. U tu se svrhu alfačestica pušta kroz uzduh, koji je zasićen vodenim parama, pa kad želimo vidjeti stazu alfačestice, povećamo obujam uzduha. Pri toj ekspanziji se uzduh ohladi i vodene pare kondenziraju (§ 124.) i to tako da se vodene kapljice uhvate električnih čestica. Staza se alfačestice dakle pospe

mikroskopskim kapljicama, koje se prostom oku čine kao jedna jedina neprekidna maglica-crta. Treba udesiti da je staza alfačestice dobro rasvjetljena. Osim toga treba da je ona u električnom polju; bez toga bi se poradi neprestanoga dolaženja alfačestica pribralo toliko iona, da bi se magla posvuda stvarala; električno polje rastjeruje ione, tako da se u čas, kad uzduh rastegnemo, ioni nalaze samo na onim mjestima, kojima baš u taj čas čestice prelete. — Najznatniji dio „Wilsonove komore“ („komore na ekspanziju“, „komore s maglicama“) prikazan je u sl. 271. Uzduh, kroz koji lete alfačestice, ispunjava plitak valjkast prostor, kojemu je dno DD pocrnjeno, da se rasvjetljene maglice ističu ispred tamne pozadine. Kao druga osnovka valjka služi staklena ploča PP, kroz koju pojav motrimo i fotografiramo. Svjetlost ulazi u komoricu sa strane kroz staklen prozor. Baterija B stvara električno polje između dna DD i vlažne donje površine ploče PP.



Sl. 271.

Sl. 272. prikazuje fotografiju staza alfačestica emitiranih iz elemenata ThC („torij C“) i ThC′; kraći traci pripadaju prvomu elementu, dulji drugomu.[1]).

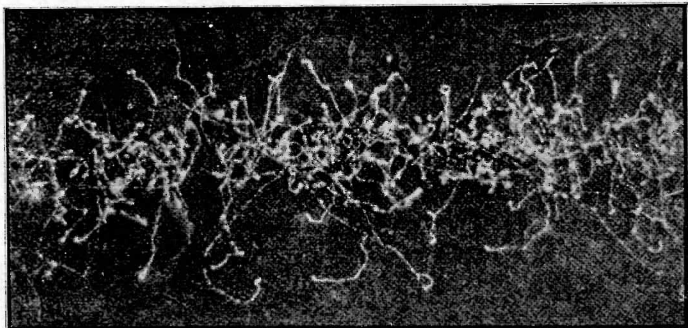


Sl. 272.

Kaošto Wilsonova komora pokazuje alfazrake, tako može služiti i kod staza drugih električnih čestica, koje se giblju toliko brzo, da ioniziraju uzduh. Na sl. 273.[2]) vidi se velik broj krivudastih elektronskih staza; elektroni su izbačeni iz atomâ, kada se kroz uzduh Wilsonove komore pustio uzak svežanj rendgenskih zraka (smjer tih zraka u fotografiji: s desna na lijevo).

[1]) Snimili: Meitner, L. i K. Freitag.
[2]) Snimio: Wilson.

232. Sastav atoma. Budući da iz radioaktivnih tvari izlijeću električne čestice, zaključujemo, da je atom sastavljen i da je elektricitet sastojina atoma. Iz izvjesnih pokusa zaključio je (Lord) Rutherford (1911.), da atom sastoji iz pozitivno električne jezgre i elektrona u



Sl. 273.

okolišu jezgre; za te elektrone kažemo, osobito kod težih atoma, da tvore atomsku ljusku. Ako atom kao cjelina nije električan, negativni je elektricitet svih njegovih elektrona zajedno uzetih onolik, kolik je pozitivni elektricitet jezgre. S obzirom na to da je masa 1 elektrona samo 1/1840 mase najlagljega atoma, vodikova, izlazi, da je masa atoma gotovo sva sadržana u atomskoj jezgri, kašto u sunčanom sustavu najveći dio mase pripada samom Suncu. Razmaci među jezgrom i elektronima razmjerno su veliki, tako da atom kao cjelina — opet poput sunčanoga sustava — sadrži mnogo praznine. Jezgra je dakle bitni dio atoma, te ona poradi velike mase svojim električnim silama daje obilježje atomu.

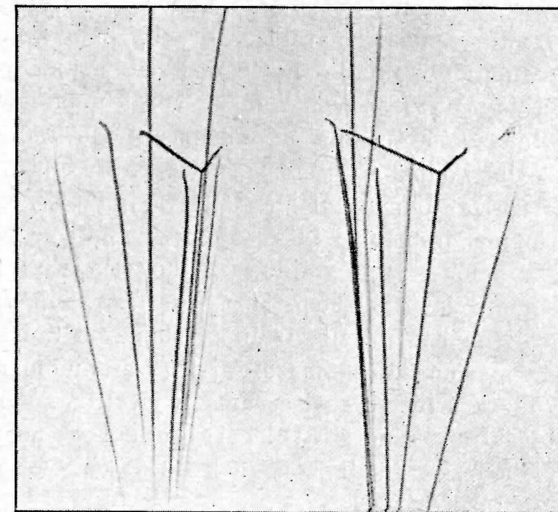
Najjednostavniju jezgru nalazimo u najlagljega atoma, vodikova. Ta jezgra sadržaje najmanju množinu pozitivnog elektriciteta t. j.

$$e = 4{\cdot}80 \times 10^{-10} \text{ el.-st. c-g-s—jed.}$$

i zove se proton (grč. πρῶτος, *prvi*). Iza vodika slijedi u Mendelejevljevu sustavu kemijskih elemenata kao drugi po redu helij; njegova jezgra upravo je alfačestica, s elektricitetom $2e$ (§ 229.). Onda dolaze redom ostali elementi s jezgrama, kojima je elektricitet $3e$, $4e$ i t. d.

Rutherfordova nauka o atomu u prvom redu objašnjava, šta će biti, kad alfačestica udari u atom. Ako se ona kod tog sraza veoma približi elektronu, elektron će se — kao negativan elektricitet — izbaciti iz atoma privlačnom silom alfačestice i atom će se ionizirati; sama pako alfačestica, kako je 4×1840 puta teža od elektrona, ne će gotovo ništa promijeniti svoje staze. Udari li pak alfačestica u samu jezgru, ne će samo ta jezgra

dobiti brzinu i postati „zrakom", nego će i put alfačestice skrenuti u drugi smjer. U sl. 274.[1]) vidimo 7 tragova alfačestica dobivenih Wilsonovom metodom, među njima jedan, koji se razgranjuje: alfačestica udarila je u jezgru atoma kisikova i skrenula na lijevo; kisikova jezgra, kao nova zraka, bačena je na desno. Alfazraka je dakle srazom kao prelomljena; uistinu se ona samo, u sićušnom luku, svinula. U sl. 274. združene su dvije fotografije, koje su snimljene u isto vrijeme sa dva razna mjesta; takvim se postupkom omogućuje, da se potpuno odredi prostorni namještaj zrake. Pobliže ispitivanje pokazuje, da je u tom slučaju sraz bio „elastičan" i da se odigrao baš tako, kao da je glatka elastična kugla udarila u mirnu elastičnu kuglu 4-struke mase (jezgra atoma kisikova je 4 puta teža od alfačestice).



Sl. 274.

U smislu Rutherfordove nauke ionizirani atom jest atom, koji u ljuski svojoj imade ili premalo elektrona ili odviše; u prvom je slučaju atom pozitivan ion, u drugom negativan. Ispitivanje spektara upućuje na to, da utjecajem jakih električnih iskara pozitivna ionizacija atoma može vrlo daleko uznapredovati. Osim toga može se pomisliti, da jaka takova ionizacija nastaje kod vrlo visoke temperature, gdje atomi poradi jakog toplinskog gibanja udarcima otkrešu jedan drugome elektrone. Što više kod grdnih temperatura unutrašnjosti mnogih stajačica atomi su valjda sasvim „oguljeni", te su od njih preostale puke, gole jezgre. Dok je atom još neelektričan, obujam mu je određen ljuskom, t. j. prostorom u kojem se kreću elektroni. Kako je taj prostor kraj sve svoje sićušnosti ipak mnogo i mnogo puta veći nego li obujam atomske jezgre, izlazi, da je neionizirani atom silno mnogo puta veći od potpuno ioniziranog atoma.

Bez toga ne bismo mogli razumjeti silnu gustoću zvijezda „bijelih patuljaka". Takva je zvijezda Sirijev Pratilac, koji prema procjeni astronoma imade masu jednaku $^3/_4$ mase sunčane, dok mu je promjer ipak samo 3 put veći od promjera zemaljskoga, tako da srednja gustoća te zvijezde izlazi oko 50000 puta veća od gustoće vode!

[1]) Snimio: Blackett.

233. Izotopi; redni broj. Prvi razvoj nauke o radioaktivnosti doveo je do zanimljive poteškoće: kako da se veliki broj novo otkrivenih radioaktivnih elemenata, svaki sa drugim polovičnim vremenom, a svi s velikim atomnim težinama — nekih 40! — svrsta u periodički sustav Mendelejeva, koji je sadržavao samo malen broj nepopunjenih mjesta. Te je teškoće nestalo, kad se opazilo, da baš među radioaktivnim elementima imade takovih, kojima se atomske mase razlikuju, dok su im kemijska svojstva jednaka. U sustavu Mendelejeva, gdje se ređaju atomi prema atomskim težinama, trebalo bi takve atome svrstati na različita mjesta, dok oni s gledišta kemije zapravo idu zajedno (Fajans 1913., Soddy 1913.). Takve elemente zovu izotopnima (grč. ἴσος, *jednak*; τόπος, *mjesto*), jer ih treba staviti na isto mjesto. Izotopni su na pr. radioaktivni elementi radij s atomnom masom 226 i „mezotorij-1" s atomnom masom 228. Ako uzmemo, da kemijska svojstva zavise samo o elektronima atomske ljuske, a razmještaj tih elektrona samo o elektricitetu jezgre, vidimo, da će atomi jednakih naboja jezgre imati jednaka kemijska svojstva, pa makar im bile atomske mase različite.

Nije dakle odlučna za kemijska svojstva elementa njegova atomna težina, već elektricitet jezgre i periodički sustav elemenata treba staviti na drugi osnov nego što ga je odredio osnivač sustava, Mendelejev, i elemente treba redati prema elektricitetu njihovih atomskih jezgara. Baš zato se cijeli broj, koji kazuje, koliko je puta elektricitet jezgre veći od najmanje množine elektriciteta $e = 4{\cdot}80 \times 10^{-10}$, zove redni broj elementa. Taj broj naime kazuje za svaki element, koji je on po redu u periodičkom sustavu. (Vodik 1., helij 2., litij 3., berilij 4. itd.).

Za radioaktivnost izlazi onda, da je cijepanje jezgre, kod kojega iz jezgre izleti ili alfačestica ili elektron. Ako jezgra izgubi alfačesticu t. j. elektricitet $+ 2\,e$, nastaje jezgra elementa, koji je bliži početku periodičkog sustava za 2 mjesta, jer se redni broj umanjio za 2. Ako izleti betazraka t. j. elektricitet $-e$, naboj jezgre postaje za $-e$, manji, t. j. on se poveća za $+e$ i novi je element pomaknut u periodičkom sustavu za 1 mjesto bliže kraju. („Zakon pomicanja".)

Do izotopnih se elemenata došlo i mimo radioaktivnosti proučavanjem kanalnih zraka (§ 220.). Prvi je J. J. Thomson našao, da se kanalne zrake dobivene u plinu neonu vladaju tako, kao da je taj plin sastavljen iz neona, kojemu je atomna masa 20, i neona, kojemu je atomna masa 22 (1912.). Aston je Thomsonova istraživanja nastavio i dotjerao, te je našao (1919. i dalje), da se osim neona i većina drugih elemenata ukazuje kao smjesa atoma različitih masa.

Kod tih se istraživanja kanalne zrake, u kojima lete kemijski istovrsne električne čestice, otklanjaju električnim i magnetskim silama. Kad bi sve one imale jednaku masu m, bio bi im i specifički naboj $e:m$ jednak, te bi otklon izašao za sve jednak. No radi razlike u masama različiti se izotopi nejednako otklanjaju, pa izmjerivanje otklona omogućuje, da se mase tih izotopa odrede.

Rezultat je Astonovih mjerenja, da su sve atomne mase približno **cijeli brojevi** (ako masu atoma kisikova označimo sa 16·000). Tako na pr. klorovi izotopi imadu atomne mase 34·983 i 36·980. Cijeli broj, koji je približno jednak atomnoj masi, zove se maseni broj izotopa, te na pr. spomenuti klorovi izotopi imadu masene brojeve 35 i 37.

Atomne mase u kemičkoj tablici atomnih težina (masa) nisu drugo nego srednje vrijednosti atomnih masa smiješanih izotopa; tako je na pr. kemička atomna masa klorova — u iznosu 35·457 — srednja vrijednost atomne mase za smjesu, u kojoj ima veće obilje klorovih atoma s masenim brojem 35, a manje tih atoma s masenim brojem 37. Zanimljivo je pri tom, kako su kemičke atomne mase stalne, što pokazuje, da su različiti izotopi nekoga elementa u prirodi svagdje u jednakim omjerima smiješani.

To doduše ne vrijedi neograničeno, te su se na pr. kod olova dobile kemičkim mjerenjima ponešto različite atomne težine za olovo s raznih nalazišta. — Naročito je znatan izotop vodikov „teški vodik", s masenim brojem 2. Ima ga doduše razmjerno malo u prirodi (1 atom na kojih 5000 atoma običnoga vodika), ali se da odijeliti. Poput alfačestice i protona dobila je i jezgra atoma teškoga vodika poradi svoje važnosti osobito ime: deuton (grč. δεύτερος, *drugi*). Molekula „teške vode" (isp. § 20.) građena je prema formuli H_2O od običnog atoma kisikova i 2 atoma teškoga vodika. — Teški vodik otkrio je Urey 1932.

234. Umjetna pretvorba atoma. Pretvorba atoma u pojavima radioaktivnosti događa se sama od sebe, bez našega utjecanja, spontano. Međutim je Rutherford našao, da možemo pretvorbe atoma izazvati u gdjekojim primjerima, kadgod zaželimo. Takva mu je umjetna pretvorba pošla za rukom najprije kod dušika (1919.), a onda i kod mnogih drugih elemenata. Njegovi pokusi pokazaše, da kad se puste alfazrake kroz uzduh, osim alfazraka običnoga dosega imade gdjegdje po koja zraka abnormalno velikog dosega, što se pokazuje uz pomoć pojava scintilacija (§ 120.). Tih zraka velikoga dosega nestane, ako alfazrake idu čistim kisikom ili pak ugljikovim dioksidom, a ako se uzduh nadomjesti dušikom, t. j. atmosferom, koja imade za 25% više dušika negoli uzduh, bit će i broj zraka velikoga dosega za 25% veći. Za postajanje zraka velikog dosega treba dakle dušika. U drugu ruku zrake velikoga dosega već su i prije dobivene, kad su se alfazrake puštale kroz vodik; za te se zrake utvrdilo, da su protoni, koji su udareni alfačesticama, pa su srazom dobili veliku brzinu (isp. Zad. 24.).

Rutherford je pokazao, da su i one zrake velikoga dosega, što se dobiju u dušiku, leteći protoni; takva je protonska zraka odlomak atoma dušikova, a nastala je time, što je alfačestica centralno udarila u dušikov atom i iz jezgre izbila proton.

Najposlije se našlo, kakva je sudbina te alfačestice, koja je svoju silnu snagu utrošila na razbijanje atoma. Ispitivanjem stotine tisuća staza alfačestica u Wilsonovim fotografijama našlo se, da u ono nekoliko primjera, gdje nastaje protonska zraka, nema odbijene alfačestice. Alfačestica se pridružila razbitom atomu.

U kratko može se taj pojav opisati nuklearnom („jezgrinom") jednadžbom (lat. *nucleus, jezgra*), koja kod atomskih pretvorba slično služi kao kemijska jednadžba kod pretvorba molekula. Pri tom se jezgra nekoga elementa označuje uobičajenim kemijskim znakom atomovim i uz taj se znak pripisuje obično lijevo dolje redni broj elementa, desno gore maseni broj. Tako se alfačestica bilježi $_2He^4$ (He, helij) ili također $_2\alpha^4$, proton $_1H^1$, deuton $_1H^2$, jezgra dušikova atoma $_7N^{14}$. Prema tome je nuklearna jednadžba za Rutherfordov primjer



$$_7N^{14} + {_2\alpha^4} = {_1H^1} + {_8O^{17}}.$$

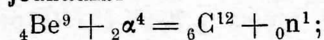
Drugi pribrojnik na desnoj strani imade redni broj 8, jer su se u srazu združili elektriciteti $7e$ i $2e$, a odletio je elektricitet e, te je preostala jezgra s elektricitetom $7e + 2e - e = 8e$ i rednim brojem 8. No taj redni broj pripada kisiku O. Maseni broj nove jezgre (atoma) izlazi $14 + 4 - 1 = 17$, tako da novi atom nije obični atom kisikov (atomna masa 16·00), već rijetki kisikov izotop mase 17.

Treba podsjetiti na to, da u nuklearnoj jednadžbi maseni brojevi samo približno označuju mase jezgara, tako da se u prvi mah čini, da su te jednadžbe pogledom na mase samo približno valjane, a pravi zbrojevi masa lijevo i desno u jednadžbi nisu jednaki. Tu dolazi međutim u obzir, da alfačestica u našem primjeru imade brzinu i prema tomu masu veću nego što je masa u mirovanju (§ 57.), a isto vrijedi za $_1H^1$-zraku i $_8O^{17}$-zraku. Ima primjera, gdje se mogu za sve čestice, koje ulaze u nuklearnu jednadžbu, odrediti mase u mirovanju a i brzine i prema tome po napucima nove mehanike izračunati mase u gibanju; za tako određene mase onda vrijedi, da je doista zbroj masa poslije nuklearnog procesa jednak zbroju masa prije sraza.

235. Neutron; sastav atomske jezgre. Nastojanje oko umjetne pretvorbe atoma dovelo je g. 1932. (Chadwick) do otkrića nove čestice, koju prozvaše neutron (lat. *neuter, ni jedan ni drugi*, t. j. ni pozitivan ni negativan). Kada alfačestice emitirane iz radioaktivnog elementa polonija Po, koje se odlikuju velikim brzinama, puštamo na element berilij Be, izlijeću zrake, kojih nam doduše Wilsonova komora ne otkriva, ali se u njoj odavaju

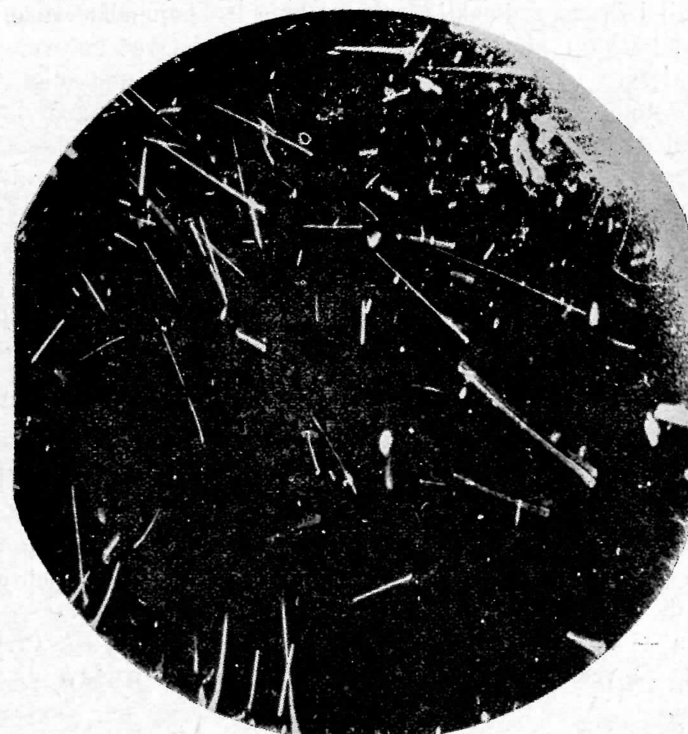
posredno time, što udarajući u atomske jezgre stvaraju zrake tih jezgara. Što te zrake dobivene iz smjese Po i Be ne ostavljaju tragova u Wilsonovu aparatu, dolazi otuda, jer ne ioniziraju zraka, a ne ioniziraju ga, jer nisu električne. Baš zato one s lakoćom lete kroz atome, pokraj atomovih elektrona i pokraj atomovih jezgara, te ih ne smetaju niti su od njih smetane. Vrlo su dakle prodirne. Treba da takav neutron udari baš u samu jezgru, da se uzmogne očitovati. Prema brzinama, koje udarcima neutrona dobivaju vodikove jezgre, protoni, zaključuje se, da su mase neutrona približno jednake masi protona.

Prema tome neutron izlazi kao neki element „n" s rednim brojem 0 (bez kemijskih svojstava!) i s masenim brojem 1. Neutron je atom, koji ne može imati ljuske. — Dobivanje neutrona iz Po i Be pomišljamo da se zbiva prema nuklearnoj jednadžbi



$$_4Be^9 + {_2\alpha^4} = {_6C^{12}} + {_0n^1};$$

od berilija dakle nastaje ugljik (C, redni broj 6).



Sl. 275.

Sl. 275. prikazuje protonske zrake dobivene u Wilsonovoj komori udarcima neutrona[1]). Umjesto uzduha bila je u komori smjesa metana

[1]) Snimili: Dee i Gilbert.

(CH_4, plin sa mnogo vodika) i argona. Kraće protonske staze imadu smjer znatno priklonjen prema (nevidljivim) stazama neutrona (zašto?); dulje protonske staze svojim smjerovima upućuju, gdje je izvor neutrona: u sl. lijevo gore, kako je doista i bilo. Taj izvor bio je teški vodik, na koji se pucalo jezgrama istoga elementa, deutonima. Pri udaru deutona o deuton u jednim primjerima nastaje proton i vodikov izotop s masenim brojem 3, u drugima — otprilike jednako često — helijev izotop s masenim brojem 3 i neutron. (Kako glase nuklearne jednadžbe tih pretvorba?).

Neutronima pripisujemo važnu ulogu kod sastava tvari, jer držimo, da se iz neutrona i protona grade atomske jezgre. Prema tome bi redni broj bio isto što i broj protona u jezgri, te je elektricitet jezgre upravo elektricitet jezgrinih protona. Maseni broj onda izlazi kao zbroj broja protona i broja neutrona. Tako bi alfačestica t. j. ${}_2He^4$ sastojala od 2 protona i 2 neutrona, jezgra neonova atoma ${}_{10}Ne^{20}$ iz 10 protona i 10 neutrona, a neonova atoma ${}_{10}Ne^{22}$ iz 10 protona i 12 neutrona i t. d.

Za radij i druge radioaktivne tvari, koje izbacuju alfačestice, možemo uzeti, da sadržavaju alfačestice u svojim jezgrama već gotove, tako reći kao manju jezgru u većoj. Značajno je, da je težina alfačestice 4·00, dok je težina protona 1·008, težina neutrona 1·009, a težina 2 protona i 2 neutrona zajedno uzetih 4·03. Očito se kod stvaranja alfačestice masa $4{\cdot}03 - 4{\cdot}00 = 0{\cdot}03$ oslobodila i u obliku energije izgubila (§ 57.). To je razmjerno velik gubitak ($^3/_4$ %) i znači, da je alfačestica osobito čvrsta sastava; da je rastvorimo, trebalo bi joj zgodnim — još nepoznatim — načinom onu energiju dovesti.

O radioaktivnosti, kod koje se emitiraju betazrake (elektroni), držimo, da se kod atomske pretvorbe jedan neutron u jezgri pretvori u proton i kod toga s t v a r a i izbaci elektron.

Sve te spoznaje i mišljenja podsjećaju na priprostu staru hipotezu, koju je iznio P r o u t g. 1815.: da su svi atomi građeni od atoma vodikovih. Mi eto kažemo: da su sve atomske jezgre sastavljene iz čestica, koje su približno jednako teške, koliko je težak najlagljí atom.

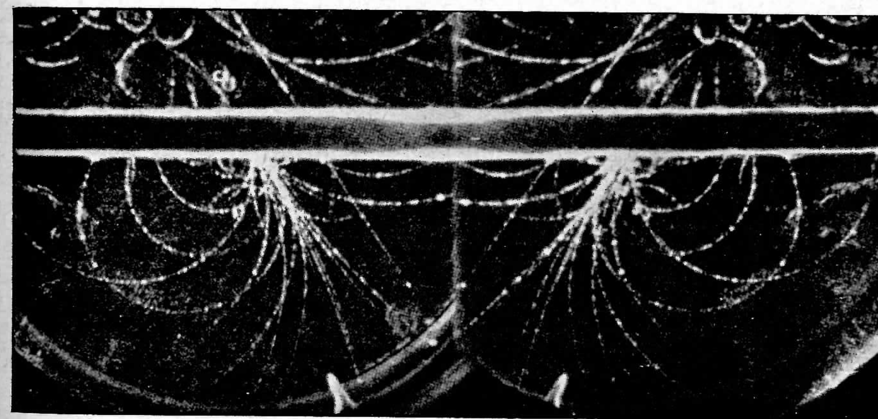
Ako izuzmemo neke atome najmanjih rednih brojeva, atomna masa izlazi nešto veća od dvostrukog rednog broja. Tako je za srebro atomna masa 107 ili 109, redni broj 47; maseni su brojevi olova — poređani prema obilju — 202, 200, 199, 201, 198 i t. d., redni broj 82. Prema tome je u pravilu za većinu atoma broj neutrona u jezgri n e š t o v e ć i negoli broj protona.

236. Pozitron. Najsitnijim česticama tvari: elektronu, protonu i neutronu pridružila se nekoliko mjeseci iza otkrića neutrona kao četvrta nauci poznata: p o z i t r o n. Pozitron treba prema njegovim svojstvima staviti uz bok elektronu, jer ima j e d n a k u (ili približno jednaku?) masu i onoliko

p o z i t i v n o g a elektriciteta, koliko elektron negativnoga, dakle $+4{\cdot}80 \times 10^{-10}$ el.-st. c-g-s—jed. Njegov je bitak prolazan, jer se lako združi s elektronom, čemu ima obilno prilike. Pronađen je prvi put u k o z m i č k i m z r a k a m a (o njima v. na kraju knjige), u kojima se poput drugih čestica pojavljuje sa golemim energijama (brzinama). Otkrio ga je Wilsonovom komorom A n d e r s o n 1932.

Da tom metodom maglica uzmognemo r a z l i k o v a t i pozitivne čestice od negativnih, Wilsonova se komora stavi u elektromagnet i to tako, da je magnetsko polje okomito na dnu i staklenom poklopcu komore. Maglica, koja je trag pozitivne čestice, svinuta je na d r u g u stranu, nego li trag negativne čestice. Polje treba da je u komori homogeno, a s obzirom na veliku brzinu kozmičkih zraka vrlo jako, jer inače se zrake ne bi primjetljivo svinule. Željezo jednoga pola elektromagnetova treba da je u dovoljnoj širini probušeno, da svjetlost može proći od komore k fotografskom aparatu.

U zamršenoj sl. 276.[1] lijevo vidimo tragove električnih čestica u komori, koja je stajala „vertikalno" i koju je horizontalna olovna ploča, 1 cm debela, dijelila u dva pretinca, gornji i donji. Jedna je kozmička zraka (nevidljiva)



Sl. 276.

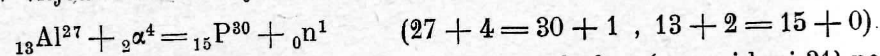
iz olova — ponešto desno od sredine — izbila obilje čestica u donji pretinac; magnetsko polje (24000 ersteda) svinulo je staze negativnih čestica na lijevo, staze pozitivnih na desno. Iz s a m e krivosti staze ne da se odrediti, kakva je masa čestica, ali iz g u s t o ć e maglica (broj kapi na 1 cm dužine) zaključuje se, da su čestice, koje su krenule na lijevo, jednakih masa, kao one, koje su pošle na desno. One prve su elektroni, druge su pozitroni. Da nije bilo magnetskoga polja, staze bi bile pravci. Što se tu pojavljuju tako glatke staze, dok su elektronske staze u sl. 273. krivudaste, dolazi otuda, što su u potonjem slučaju brzine elektrona manje. — Desna

[1]) Snimio: A n d e r s o n.

polovica sl. 276. prikazuje isti pojav kao i lijeva, ali s drugoga gledišta, a cijela je slika dobivena na taj način, da se u isti čas fotografirala i Wilsonova komora neposredno (lijevo) i njezina zrcalna slika (desno).

Od četiri čestice elektron, proton, neutron i pozitron po dvije imadu (približno) jednake mase: elektron i pozitron masu $\mu = 9{\cdot}0 \times 10^{-28}\,g$, proton i neutron masu $m = 1840\,\mu$. Elektron je negativno električan, dok su proton i pozitron pozitivni, svi sa jednakim elektricitetom e. Nije poznata neelektrična čestica mase μ, a nije poznata ni negativna čestica mase m. O čestici mezotron v. na kraju knjige.

237. Umjetna radioaktivnost. U prošlim se §§ razložilo, da radioaktivne tvari izbacuju ili alfačestice ili elektrone i da kod umjetne pretvorbe atoma iz atomskih jezgara izlijeću protoni a i neutroni. Znanje o atomskim pretvorbama bitno su proširili supruzi Joliot—I. Curie, kada su otkrili umjetnu radioaktivnost (1934.) Stavljajući u blizinu aluminijeva listića element polonij (brze alfazrake!) isprva su našli, da listić izbacuje pozitrone. Naskoro zatim opaziše, da emisija pozitrona ne započinje odmah, kad se aluminij izloži poloniju, već treba na to koju minutu čekati; u drugu ruku kada se polonij ukloni, izbacivanje pozitrona ne prestaje odmah, nego traje neko vrijeme dalje, sa sve manjim obiljem. I. Curie i Joliot utvrdiše, da se u tom primjeru radi o dva pojava, koji slijede jedan za drugim. Najprije se aluminijeva atomska jezgra (redni broj 13) uhvativši alfačesticu pretvori u jezgru atoma fosforova (redni broj 15) i pri tom izgubi neutron; za taj pojav vrijedi nuklearna jednadžba



$$_{13}Al^{27} + {}_{2}\alpha^{4} = {}_{15}P^{30} + {}_{0}n^{1} \qquad (27 + 4 = 30 + 1\ ,\ 13 + 2 = 15 + 0).$$

Dobiveni atom fosfora P razlikuje se od običnog fosfora (maseni broj 31) ne samo masenim brojem (30) nego i time da nije postojan, već se vlada kao radioaktivan atom nove vrsti: kod raspada atom izbaci pozitron. Nuklearna jednadžba za taj slučaj umjetne radioaktivnosti glasi



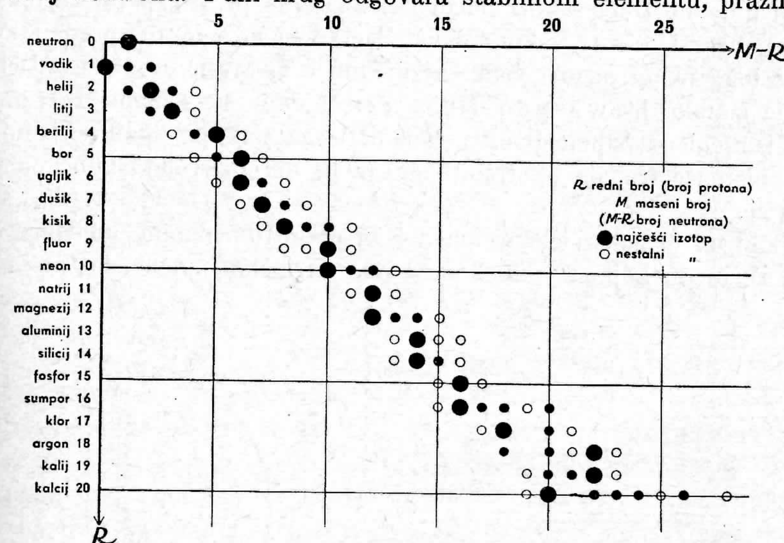
$$_{15}P^{30} = {}_{14}Si^{30} + \text{pozitron} \qquad (30 = 30 + 0\ ,\ 15 = 14 + 1).$$

I. Curie i Joliot odredili su i polovično vrijeme toga novoga radioaktivnoga elementa: $3^{m}\ 15^{s}$. Da je nova tvar doista izotop fosfora, pokazali su tako, da su kemijskim postupkom, kojim se upravo fosfor luči od aluminija, oslobodili aluminij njegova radioktivnoga proizvoda, te je radioaktivnost prešla u odijeljeni kemijski pripravak. Dakako da je s obzirom na maleno polovično vrijeme trebalo kemijsku pretvorbu izvesti što brže.

Opisani primjer umjetne radioaktivnosti nije bio jedini, a pokazalo se, da se ne samo udarcima alfačestica, već i protonima, deutonima, neutronima, a i gamazrakama daju načiniti umjetno radioaktivni elementi. Jedni od njih u raspadu izbacuju elektrone, drugi pozitrone.

Zanimljivo je, da se alfazrakama nisu mogli stvarati radioaktivni elementi iz elemenata, kojima je redni broj veći od 46 (paladij); kod većih naime rednih brojeva veliki elektricitet jezgrin odbojnošću priječi i najbržim alfačesticama, da ulete u jezgru. Naprotiv s neutronima mogu se takve pretvorbe izvesti i s elementima sve do najvećega rednoga broja 92 (uran). (Fermi.)

Nakon tih istraživanja danas poznajemo u 92 kemijska elementa više od 500 vrsti atoma, što postojanih, što radioaktivnih. U grafičkom prikazu na sl. 277. vidi se to obilje za prvih 20 elemenata periodičkoga sustava. Kao apscise (dolje upravljene) naneseni su redni brojevi R, kao ordinate (na desno) razlike $M-R$ masenog broja M i rednog broja R. Središte svakoga malenog kruga ima apscisu, koja kazuje broj protona u jezgri, a ordinatu koja znači broj neutrona. Puni krug odgovara stabilnom elementu, prazni radio-



Sl. 277.

aktivnom; veći krug znači najobilniji izotop. Kada bi sve atomske jezgre sadržavale toliko neutrona koliko protona, sva bi središta krugova ležala na pravcu, koji raspolavlja kut koordinatnih osi; u skladu s onim, što se reklo u § 235., vidi se eto, da već kod manjih rednih brojeva neutroni dobivaju prednost pred protonima.

Od elementa broma $_{35}Br$ (maseni brojevi izotopa 78, 79, 80, 81, 82, 83) poznajemo dvije vrsti izotopa $_{35}Br^{80}$, koje su obje radioaktivne, ali s različitim polovičnim vremenom. Jedna vrst tih atoma ima polovično vrijeme 18 min, druga 4·5 sata. Prema tome dva atoma, koja imadu u jezgri jednako mnogo protona, a i broj neutrona im je jednak, te im se i težine i kemijska svojstva poklapaju, mogu ipak biti različiti u svojoj radioaktivnosti.

*

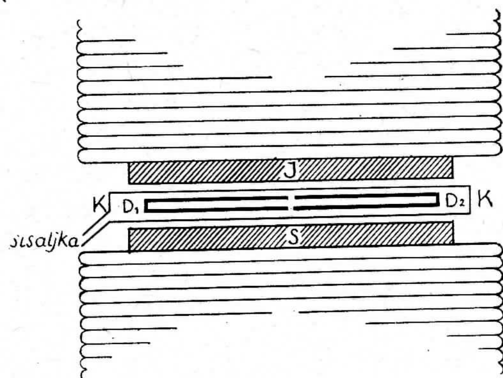
Očito su u njihovim jezgrama protoni i neutroni različito povezani. Za dvije jezgre, koje sastoje od jednake protonske i neutronske građe, a ipak su različite, kažemo da su izomerne (grč. ἴσος, jednak; μέρος, dio). Ta nuklearna izomerija dobila je ime iz organske kemije, gdje izomernima zovemo dva kemijska spoja, koji su različiti, premda im se molekule sastoje od jednake atomske građe.

San sredovječne alkemije u nekom se pogledu obistinio: današnja fizika poput neke „nove alkemije" doista pretvara elemente jedne u druge.

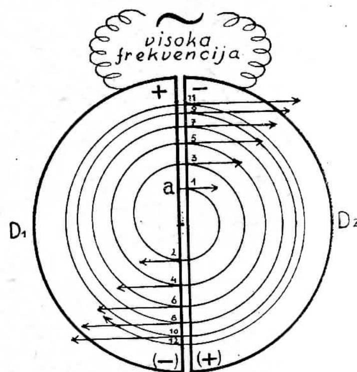
Zad. 172. Pročitajte iz grafičkog prikaza sl. 277, kojim elementima pripadaju atomi s masenim brojem 27.

238. Ciklotron. Kao brze čestice, kakve trebaju pri pretvorbi atoma, isprva su služile samo alfačestice. Kasnije se prešlo na to, da su se u tu svrhu umjetno ubrzavali ioni u vakuumcijevima. No kod toga je teškoća, da za to ubrzavanje ne treba samo velika napetost (na pr. iz generatora opisanog u § 170.), nego i golema vakuumcijev. Sagrađeni su međutim uređaji, kojima se i bez toga mogu postići velike brzine iona. Takav je uređaj ciklotron, što ga je izumio Lawrence (1932.); u njemu su s pomoću razmjerno malene izmjenične napetosti od nekoliko tisuća volta postignute brzine iona, za koje bi inače trebalo upotrebiti makar 10 miljuna volta stalne napetosti ili još više.

Ciklotron je golem elektromagnet sa ravno omeđenim polovima S i J (sl. 278.a), među kojima jako, homogeno, vertikalno magnetsko polje ispu-



Sl. 278a.



Sl. 278b.

njava širok i nizak valjkast prostor. Tako je u jednom ciklotronu, čiji je elektromagnet sagrađen od 40 tona željeza i 9 tona bakrene uzvojnice, promjer polova 90 cm, razmak njihov 10 cm, a jakost polja do 18000 ersteda. U tom polju giblje se horizontalnom stazom ion, koji hoćemo ubrzati. No takav ion vlada se kao električna struja: magnetsko polje djeluje na nj silom, koja je okomita na polju i okomita na struji, t. j. brzini iona, te je prema tomu horizontalna (§ 198.). Ta sila savija stazu ionovu i kako mu ne mijenja brzinu, t. j. njegovu „struju", ostaje i spomenuta sila u svakoj točki staze ionove jednaka. Prema tomu je staza svuda jednako savinuta, t. j. ona je kružnica. (Otuda i ime ciklotron; grč. κύκλος, *krug*; — τρον, grč. nastavak.) Ne bi međutim imalo smisla, da ion podjednako opisuje jednu te istu kružnicu, već se on zgodnim načinom, kadgod prevali polovicu kruga, ubrza pri čemu promjer njegove staze naraste. Staza se ionova dakle sastoji od niza polukružnica sve većih promjera, koje se nadovezuju jedna na drugu, tako da ta staza izlazi kao neka plosnata spirala (sl. 278.b). — Da se ion može slobodno gibati, smještena je među polovima S i J velika kutija KK, iz koje se isiše zrak. U toj je kutiji uređaj za ubrzavanje iona: $D_1 D_2$. To je širok plosnat valjak od kovine, koji je razrezan vertikalnim prorezom u dva jednaka dijela D_1 i D_2, koji su ponešto razmaknuti. Ta dva vodiča spojena su jedan s jednim polom, druga s drugim polom aparata, koji daje izmjeničnu napetost velike frekvencije. Sva je staza ubrzavanoga iona u šupljini tih vodiča. No kako u unutarnjosti vodiča nema električne sile, ion se nalazi u električnom polju samo onda, kad prelazi iz unutarnjosti jednoga vodiča u unutarnjost drugoga. Ako je D_1 pozitivno, D_2 negativno, pozitivan ion pod utjecajem električnoga polja pođe od D_1 prema D_2, dobije brzinu i uleti u D_2 kod 1, gdje pod utjecajem samoga magnetskoga polja prevali pol kružnice i onda izleti. Ako je u taj čas D_2 pozitivno, a D_1 negativno, ion će se na prelazu prema D_1 nanovo ubrzati. Treba dakle frekvenciju električnog titranja tako udesiti, da pol titraja traje baš onoliko koliko treba da ion opiše pol kružnice. Ion će u tom slučaju ubrzati se svaki puta, kadgod prelazi iz vodiča D_2 u D_1 (na mjestima 2, 4, 6, . . .) ili obratno (na mjestima 1, 3, 5, . . .). Kod svakog takvog prelaza energija iona naraste za jednak iznos i to ide dotle, dok se staza njegova ne približi periferiji šupljine. Ako je na prvom prelazu ion ubrzan maksimumom napetosti, koji neka iznosi na pr. 4000 volta, a do završetka staze bilo je 300 prelaza iz jednoga D u drugi, ion je najposlije toliko ubrzan, koliko bi bio ubrzan u vakuumcijevi stalnom napetošću $4000 \times 300 = 1200000$ volta.

Time je objašnjena osnovna misao toga uređaja; još je trebalo riješiti pitanje, kako da se stvaraju ioni, koje želimo ubrzati, a i to, kako će se ubrzani ioni na periferiji upraviti na cilj, kojemu su namijenjeni.

Sa računske strane primjer ciklotrona srodan je sa slučajem, kada magnetsko polje H ersteda djeluje na komadić žice dužine ab cm, kroz koji teče električna struja i el.-magn. c-g-s—jed. Ako je žica okomita na polju, može se sila izračunati da je jednaka $H \cdot ab \cdot i$ din (§ 198.). Iz toga se može zaključiti, da magnetsko polje djeluje na česticu, koja ima elektricitet e el.-magn. c-g-s—jed. i brzinu v cm/sek, silom $H \cdot v \cdot e$. To je centripetalna sila, kojom polje djeluje na ion, a kako za centripetalnu

silu vrijedi opća formula $m \cdot v \cdot \omega$ (ω radijan/sek kutna brzina, § 37.), dobiva se jednadžba

$$H \cdot v \cdot e = m \cdot v \cdot \omega$$

i odatle $\omega = H \cdot e/m$. Kutna brzina iona jednaka je umnošku magnetskoga polja i specifičnog naboja ionova, a nije zavisna o brzini v. Svaku polukružnicu u ciklotronu ion prevali u jednakim vremenima.

IV. NAUK O VALOVIMA

1. Titranje i valovi

239. Jednostavno titranje (dodaci k § 26.). U § 26. ispitalo se jednostavno titranje, u §§ 206.—208. električni titraji. Ovdje će se nauka o titranju dalje izvesti. — Ako tijelo treba za 1 titraj na pr. $T = 1/200$ sek, svršit će se u 1 sek u svemu $n = 200$ titraja. Izlazi na isto, spomene li se vrijeme titranja T ili pak „broj titraja" n („frekvencija", isp. § 207.; lat. *frequentia, velik broj*). Među tima brojevima vrijedi snošaj

$$T = 1/n \text{ ili } n = 1/T;$$

jedan je recipročna vrijednost drugoga. „Broj titraja" kaže se kraće umjesto „broj titraja u 1 sek".

U § 26. izvela se formula za elongaciju kod jednostavnog titranja: $s = S\, sin \left(360^0 \cdot \frac{t}{T}\right)$. Prema toj je formuli u početku brojenja vremena, t. j. u čas $t = 0$, elongacija $s = 0$. Počnemo li vrijeme brojiti za $^1/_4$ vremena titraja kasnije, pa vrijeme bilježimo sa t', treba staviti $t = t' + {}^1/_4\, T$.

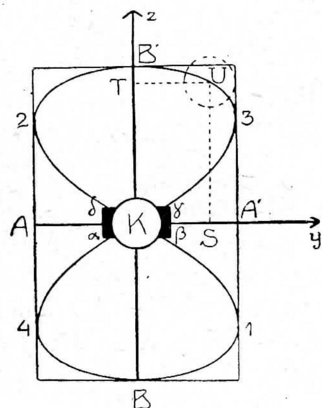
Onda izlazi

$$s = S sin\left[360^0 \cdot \left(\frac{t'}{T} + {}^1/_4\right)\right] = S\, sin\left(360^0 \cdot \frac{t'}{T} + 90^0\right) = S\, cos\left(360^0 \cdot \frac{t'}{T}\right).$$

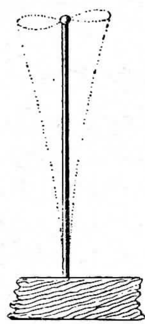
Ako s titranjem, kojemu je elongacija $s = S\, sin\, (360^0 \cdot nt)$, isporedimo titranje iste frekvencije s elongacijom $s' = S'\, sin\, (360^0 \cdot nt - C)$, kažemo, da je drugo titranje za prvim zaostalo „u fazi" za C.

240. Sastavljanje titraja okomitih. U mnogim nam se primjerima nameće pomisao, da je gibanje složeno od dva titranja, koja se sastavljaju po zakonu paralelograma. Jednostavan primjer daje sprava kaleidofon (Wheatstone 1827., sl. 279., καλός, *lijep*; εἶδος, *lik*; φωνή, *glas*, jer se u nekih sprava čuje zvuk). Čelični štap pravokutna proreza $\alpha\, \beta\, \gamma\, \delta$ (sl. 278.) učvršćen je na jednom kraju, a na slobodnom kraju nosi sjajnu kuglicu K. Ako štap svinemo u ravnini simetrije i onda pustimo, kuglica će titrati u toj ravnini, pa ako su amplitude malene, put je kuglice pravac AA' ili BB'. Budući da je debljina štapa $\alpha\beta$ različna od debljine $\alpha\delta$, trebat će za titraj u pravcu AA' drugo vrijeme nego li za titraj u pravcu BB'. Ako štap svinemo u kojem drugom smjeru i pustimo, kuglica će titrajući opi-

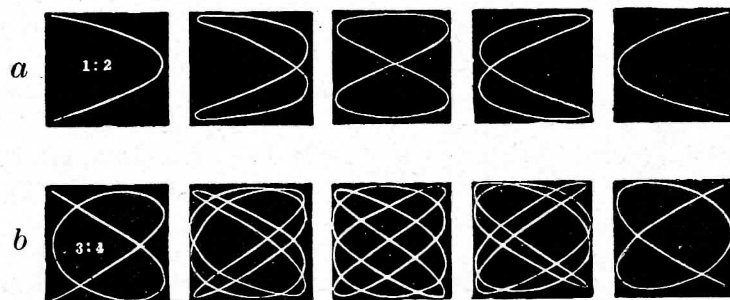
sivati krivulju; to se gibanje sastavlja iz spomenutih titraja po zakonu paralelograma putova. Kad bi u neki čas poradi titranja u pravcu AA' elongacija bila KS, a KT poradi titranja u pravcu BB', bit će u taj čas rezultujuća elongacija KU, gdje je U četvrti vrh paralelograma $SKTU$. Uz zgodan oblik proreza $\alpha\beta\gamma\delta$ točka će U opisivati nanovo po više puta istu krivulju; pri tom ne vidimo redom točaka te krivulje, već nam sva krivulja neprekidno sja, jer oćut svjetlosti dosta dugo traje. Krivulje se ove ruke mogu i drugim načinima dobivati, a zovu se Lissajousove.



Sl. 279.a


Sl. 279.b

Lissajousove su krivulje raznovrsne, pa ćemo na primjeru sl. 279., gdje krivulja ima oblik osmice, pokazati, koji je uvjet za izvjesnu sliku. Neka je krivulja opisana baš jedanput, t. j. neka je sjajna kuglica prevalila put *B 12 B' 34 B*. Dok se pomakla od *B* do *1*, izvela je u smjeru AA' $^1/_4$ titraja, isto je tako na putovima *12*, *23*, *34* izvela po $^1/_2$ titraja, a na putu *4 B*



Sl. 280.

opet $^1/_4$ titraja; prema tome je kuglica, kad prevali cijelu krivulju, izvela u smjeru AA' u svemu $^1/_4 + ^1/_2 + ^1/_2 + ^1/_2 + ^1/_4 = 2$ titraja. U isto je vrijeme izvela u smjeru BB' u svemu 1 titraj (zašto?). Da nastane krivulja oblika osmice, treba dakle da brojevi titraja za komponentna titranja stoje u omjeru 2 : 1. Međutim uz taj isti omjer mogu nastati još i druge neke krivulje, te su razni primjeri predočeni u sl. 280. a; koji li će lik izaći, stoji do toga, koje su faze komponentnih titranja. Sl. 280. b prikazuje Lissajousove krivulje, koje nastaju, kad je omjer brojeva titraja 3 : 4. Kadgod brojevi titraja stoje

jedan prema drugomu kao cijeli brojevi, bit će rezultujuće gibanje u Lissajousovoj krivulji. Ta je krivulja to jednostavnija, što su manji omjerni brojevi (omjer treba da je skraćen!). Ako je broj titraja za jedno komponentno titranje poznat, može se iz Lissajousove krivulje odrediti, kolik je broj titraja za drugo komponentno titranje (Lissajous 1855.).

Znatan je primjer, kad je omjer brojeva titraja samo približno jednak omjeru malenih cijelih brojeva. Ako na pr. na 2000 titraja u smjeru AA' dolazi 1001 titraj u pravcu BB', omjer je tih brojeva 2000 : 1001, t. j. približno 2 : 1. Pojedini se zavoji zamršene krivulje, što pripada omjeru 2000 : 1001, približno podudaraju sa likovima predočenima u sl. 280. a. Trebat će sada odulje vrijeme, da bude cijela zamršena Lissajousova krivulja opisana, tako da je ne ćemo vidjeti svu najedamput, već ćemo vidjeti likove sl. 280. a, kako postepeno prelaze jedan u drugi.

Najjednostavnija krivulja izlazi, kad je omjer brojeva titraja 1 : 1. Ako se pri tom čas prolaženja kroz položaj ravnoteže za oba komponentna titranja podudara, rezultujuće je titranje u pravcu. Doista ako elongaciju za titranje smjera AA' označimo sa y, a za titranje smjera BB' sa z, amplitude sa a i b, možemo bilježiti

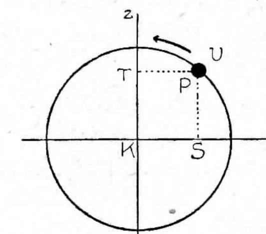
$$y = a \sin (360^0\ t/T). \qquad z = b \sin (360^0\ t/T),$$

dakle je

$$y/z = a/b,$$

a to je jednadžba pravca.

Ako se faze komponentnih titranja ne podudaraju, izlazi općenije, da omjeru 1 : 1 pripada kao Lissajousova krivulja elipsa. Razmotrit ćemo samo primjer, gdje su amplitude jednake, a jedan titraj zaostaje za drugim u fazi $^1/_4$ vremena titraja. Oko ishodišta K koordinatnoga sustava $y\ K\ z$ nacrtajmo kružnicu (sl. 281.), a na njoj se jednoliko giblje geometrijska točka P. Projekcije S i T točke P izvode u koordinatnim osima jednostavna titranja jednakih amplituda; kad je $KS = 0$, onda je KT najveće, dakle faze imadu željeni razmak. Rezultujuća elongacija KU dobiva se iz paralelograma $SKTU$; prema tome se točka U podudura s točkom P, ona dakle opisuje jednoliko kružnicu.



Sl. 281.

Zad. 173. Neka se isto dokaže s pomoću analitičke geometrije.

S tim se primjerom matematički podudara sastavljanje magnetskih polja kod dvofaznih struja (§ 218.). — Primjenjujući dvije izmjenične struje različitih frekvencija možemo pokazati Lissajousove slike na zastoru Braunove cijevi. (§ 224.)

Zad. 174. Neka se analitičnogeometrijski dokaže, da je Lissajousova slika, što se dobije sastavljanjem jednostavnih titraja iste frekvencije, krivulja 2. stupnja (elipsa!). Naputak: Eliminiraj t iz jednadžbi $y = a \sin (360^0 \cdot nt)$ i $z = b \sin (360^0 \cdot nt + \varphi)$.

Zad. 175. Neka se nađe jednadžba krivulje u sl. 279. Naputak: Budući da je u izvjestan čas i $y = 0$ i $z = 0$ (točka K), odabrat ćemo taj čas za početak vremena $t = 0$, pa će vrijediti jednadžbe $y = a \sin (360^0 \cdot 2nt)$ i $z = b \sin (360^0 \cdot nt)$. $[b^4 y^2 = 4a^2 z^2 (b^2 - z^2)]$

Zad. 176. Kako glasi jednadžba Lissajousove krivulje, što nastaje sastavljanjem titraja s elongacijama $y = a \cos (360^0 \cdot 2nt)$ i $z = b \sin (360^0 \cdot nt)$? $[y/a = 1 - 2z^2/b^2]$

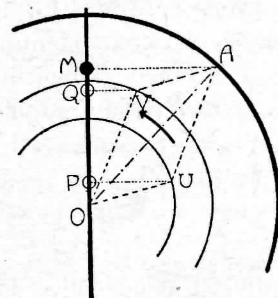
Zad. 177. Neka se konstruira Lissajousova slika, koja nastaje sastavljanjem jednostavnih titraja jednakih amplituda, kojima su frekvencije u omjeru 1 : 2. Naputak: Nacrta se kružnica i dva međusobno okomita promjera, pa se obodnica razdijeli u jednake dijelove, na pr. 16, svako se dijelište projicira na jedan promjer, a svako drugo dijelište na drugi i t. d.

Zad. 178. Nađite omjer brojeva titraja za kojugod krivulju u sl. 280. a, b.

241. Sastavljanje titraja istoga smjera i jednakih frekvencija.

Ako je poradi jednoga titranja elongacija tijela OP, poradi drugoga titranja elongacija OQ (sl. 282.), gdje OP i OQ leže u istom pravcu, izlazi rezultujuća elongacija OM algebarskim zbrajanjem

$$OM = OP + OQ.$$



Sl. 282.

Kako su komponentna titranja jednostavna, bit će P i Q projekcije točaka U i V, koje se pomiču jednoliko u obodnicama dvaju krugova. Ako su još i frekvencije jednake, polumjeri se OU i OV okreću s jednakim kutnim brzinama; prema tome se ne mijenja paralelogram $UOVA$, pa njegov vrh A i sam opisuje jednoliko obodnicu kruga. Ako sada projiciramo diagonalu OA na smjer titranja, dobivamo $proj. OA = proj. OU + proj. OV = OP + OQ = OM$. Točka M podudara se dakle u svaki čas s projekcijom točke A, te ona izvodi jednostavno titranje, kojemu je vrijeme titranja onoliko, koliko i svakomu komponentnomu titranju.

Ako se faze komponentnih titranja podudaraju, bit će kut $UOV = 0$, pa je $OA = OU + OV$, t. j. amplituda je rezultantnoga titranja jednaka zbroju amplituda komponentnih titranja.

Ako jedno komponentno titranje za drugim zaostaje za $^1/_2$ vremena titraja, kut je $UOV = 180^0$, pa je $OA = OV - OU$. Ako su k tome još amplitude komponentnih titranja međusobno jednake, izlazi jednostavni ali važni primjer, gdje je $OA = 0$, t. j. sastavljanjem obaju gibanja izlazi mirovanje.

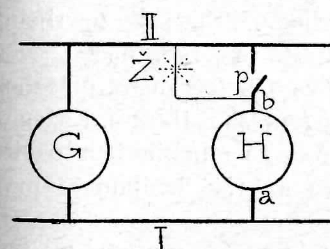
242. Udari.

Kad treba sastaviti dva jednostavna titranja istoga smjera, a frekvencije su im približno jednake, rezultujuće je titranje približno opet jednostavno. Kako je vrijeme jednoga komponentnoga titranja nešto dulje, to će titranje za drugim sve više zaostati; u čas, kad se oba komponentna titranja podudaraju u fazi, amplituda je rezultantnoga titranja najveća; kad iza toga prvo titranje za drugim zaostane za $^1/_2$ vremena titranja, amplituda je rezultantnoga gibanja najmanja. Ta se vrst gibanja lijepo predočuje spravom, kod koje dvije glazbene viljuške titraju ponešto različnim brojevima titraja; na kraku jedne viljuške učvršćena je počađena ploča, a na kraku druge viljuške jest pero, koje slabo zadire u čađu ploče; kraci su jedne viljuške usporedni kracima druge, a jedna se viljuška može u smjeru krakova pomicati. Ako kod toga pomicanja samo jedna viljuška titra, nastaje na ploči krivulja sinusoida (§ 26.), koja zorno predočuje relativno gibanje pera spram ploče. Ako obje viljuške titraju, izlazi valovita krivulja, kojoj se visine vala periodički mijenjaju (sl. 283.).

Ako slušamo dva glazbena instrumenta malne jednakih frekvencija, bubnjić će našega uha u isti mah izvoditi dva komponentna titranja; rezultantno titranje ima periodički promjenljivu amplitudu, pa se i jakost zvuka periodički mijenja. Taj se pojav zove „udari". Ako su frekvencije na pr. 200 i 203 titraja u sek, drugo će titranje preteći prvo svake sekunde za 3 titraja, zvuk će dakle 3 puta u sekundi nabujati, čut će se 3 udara. Općeno, ako je n frekvencija sporijega instrumenta, n' frekvencija bržega, broj je udara $n' - n$ u sek. — Pojav udara graditelji su orgulja odavna opazili, a protumačio ga je Sauveur (oko 1700.).


Sl. 283.

Kada generatoru G, koji šalje izmjeničnu struju u vodiče I i II (sl. 284.), želimo radi obilnog trošenja struje priklopiti još jedan takav generator H, treba da se prije toga uvjerimo, da je frekvencija drugoga generatora jednaka frekvenciji prvoga i da se (električki) titraji jednoga i drugoga generatora u fazi podudaraju. Stegača se a generatora H sastavi s vodičem I, dok je sveza druge stegače b s vodičem II kod p prekinuta; oni su samo spojeni kroz „faznu žarulju" Ž (koja propušta samo slabu struju). Nisu li frekvencije točno jednake, potencijal u b drukčije titra negoli potencijal u II, pa se napetost, što vlada među tima točkama, periodički mijenja, žarulja izmjenice zasja i utrne. Što je manja razlika frekvencije, to sporije slijede te izmjene sjaja. Kad su frekvencije dovoljno jednake, može se u čas, kad se fazna žarulja utrne, struja kod p sklopiti. (Našlo se, da onda frekvencije obadvaju generatora automatično ostaju u skladu.)



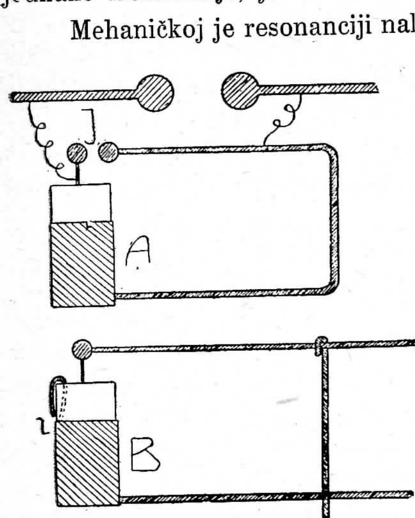
Sl. 284.

243. Resonancija.

Na istom stalku neka vise dva njihala, kojima su vremena njihanja jednaka. Pustimo li jedno njihalo da se njiše, doći će i drugo u njihanje. Poradi njihanja prvoga njihala trese se stalak i tom se trešnjom zanjiše i drugo njihalo. Gibanje je stalka doduše tako neznatno, da ga i ne vidimo, no znatni njegov učinak dolazi otuda, što se vremena njihanja podudaraju, te gibanje stalka djeluje na drugo njihalo u zgodnim vremenskim razmacima. Ako se drugo njihalo prikrati, te budu vremena njihala različita, ostat će drugo njihalo na miru. — Teško zvono može slabom silom i dijete zanjihati, ako tu silu u zgodnim razmacima ponavlja.

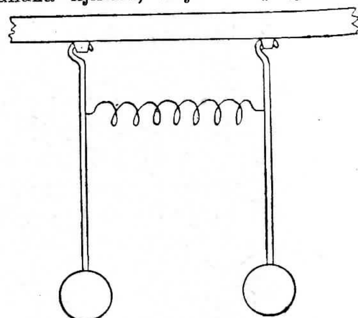
Kad se titranje jednoga tijela izazivlje titranjem drugoga, zove se to **resonancija**, jer se taj pojav osobito opaža kod zvuka, gdje se zvukom jednoga tijela i drugo pobuđuje na zvučenje (lat. *resono, odjekujem*). Ako se na razapetu vodoravnu žicu stavi papirni „jahač", a u blizini titra žica jednake frekvencije, jahač će odskočiti (da Vinci).

Mehaničkoj je resonanciji slična električka resonancija (Hertz 1887.) Ona se jednostavno pokazuje pokusom Lodgeovim (1890.). Izvanji je oblog lajdenske boce *A* širokim okvirom od žice gotovo spojen s unutarnjim; luči ih samo iskrište *I* (sl. 285.). Kad bocu električkim strojem dosta nabijemo, preskoči iskra, t. j. u kratak čas proteče okvirom izmjenična struja velike frekvencije. Ako je u blizini zgodno namještena druga lajdenska boca *B*, s okvirom od žice, koji spaja oba obloga, pobuđivat će se poradi indukcije u njezinom okviru izmjenične elektromotorne sile. (Boca *B* nalazi se u slici ispod *A*; treba je pomisliti ispred A.) U § 206. razložilo se, koliko je vrijeme titraja; ako se vrijeme titraja za drugu bocu podudara s vremenom titraja za prvu, nastat će u okviru druge boce tako jake inducirane struje, da će napetost među oblozima te boce veoma narasti, te će u kratkom iskrištu *i* preskočiti iskra. Kažemo, da je nastala „električka resonancija". Ako se mijenjanjem okvira boce *B* pokvari jednaka „udezba" boca, ne će se više izbijanjem prve boce poroditi iskre kod druge.

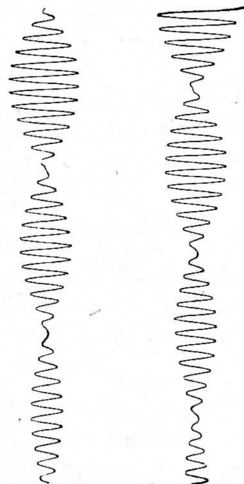


Sl. 285.

Pojav je resonancije često zapleten i pokazuje zanimljivih tančina. U sl. 286. predočena sprava (Oberbeck 1888.) sastavljena je od dva jednaka njihala, koja su „tijesno skopčana" elastičnim perom. Ako se jedno njihalo zanjiše, a drugo je na miru, iza nekoliko će njihaja drugo njihati s najvećom amplitudom, a prvo će na čas malne mirovati. Onda će opet prijeći njihanje na prvo njihalo i t. d. Grafički je predočeno gibanje desnoga njihala desnom krivuljom sl. 287., gibanje lijevoga lijevom krivuljom.


Sl. 286.

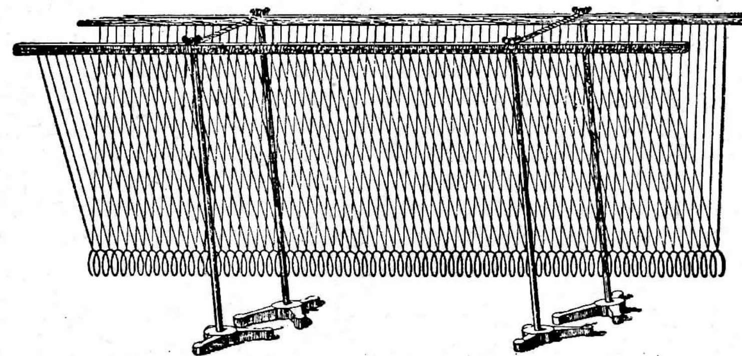
244. Pojam vala. Kad motrimo valove vode, opažamo, da čestice vode redom jedna za drugom titraju, jedne oponašaju gibanje drugih. Imade i drugih vrsti gibanja, koja pokazuju to svojstvo, pa poradi slič-


Sl. 287.

nosti uopće sva ta gibanja zovemo „valovima". Kad se površinom vode šire valovi, šipka, koja pliva na vodi, titra, ali se u glavnome ne miče s mjesta; možemo reći: valovi ne prenose tvari, već prenose gibanje. Još je bolje reći: valovi prenose energiju. Ako to uzmemo kao osnovno svojstvo valova, ne ćemo ubrajati u valove gdjekoji pojav, koji se u prvi mah pričinja valom. Na pr. sipine pijeska u pustinji i drugdje naliče valovima, no njihovo sporo napredovanje jest prenošenje tvari (i nastaje poradi vjetra), a energija tih tobožnjih valova nije u njima samima, već je razorno djelovanje pijeska učinak vjetra. Kad se klasje u polju ustalasa, ne prenosi se doduše tvar, no ni taj pojav ne ide među valove, jer klasovi ne prenose ni energije; jedan klas ne djeluje na drugi, već se zibanje i tamo pobudi vjetrom.

Tijelo, kojim se val širi, obično se zove „sredstvom"; granice sredstva ne treba da budu određene.

Ako čestice sredstva titraju u smjeru, u kojemu val napreduje, zovu se valovi uzdužni ili longitudinalni; primjer tome nalazimo kod Weinholdova „valostroja". Dugačka uzvojnica od bakrene žice visi na mnogo niti vodoravno (sl. 288.). Udarimo li na jedan kraj uzvojnice i to


Sl. 288.

smjerom dužine njezine, udarac napreduje prema drugom kraju, te zavoji uzvojnice redom zatitraju. Val se širi s jednog kraja na drugi, dakle smje-

rom uzvojnice, a u istom smjeru titraju i čestice. Važan su primjer longitudinalnih valova valovi zvuka u uzduhu.

Ako udarimo po dugačku razapetu užetu, razabiramo, kako od mjesta udarca leti k svakom kraju užeta po jedan pregib. Čestice se užeta pri tom uzdrmaju smjerom, koji je okomit na uže, t. j. na smjer širenja vala. Ako je smjer titranja okomit na smjer širenja vala, valovi se zovu poprečni ili transverzalni. (Lat. *transversus, poprečan; longitudo, dužina.*)

Za velike valove, kojima se njišu lađe, vrijedi, da čestice vode približno opisuju vertikalne krugove, kojih ravnine idu kroz smjer širenja vala. Ti valovi nisu dakle ni uzdužni ni poprečni, jer titranje imade komponentu i u smjeru širenja vala i u smjeru okomitom.

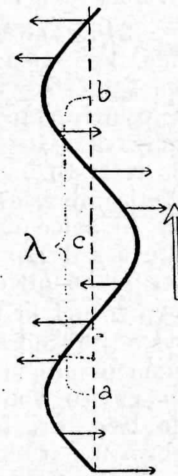
Kod uzdužnih valova čestice titraju u pravcima; kod poprečnih može biti titranje i u krivulji, a ravnina je krivulje okomita na smjer širenja. Ako kod poprečnih valova čestice titraju u pravcima, kažemo, da je val ravno polarizovan; ako čestice opisuju krugove, valovi su kružno polarizovani; a kad su putovi čestica elipse, zovu se valovi eliptički polarizovani. Ti su pojmovi važni u nauci o svjetlosti.

Titranje, što se prenosi valovima, ne treba da baš bude gibanje ili mehaničko titranje; u električkim se valovima prenosi titranje električke sile. Električki valovi u žici spomenuti su već u § 212., „slobodni" će se elektromagnetski valovi razmatrati u osobitom odsjeku.

Kada govorimo na jednom kraju cijevi duge mnogo metara, zvuk se na drugom kraju dobro čuje; valovi se zvuka pri tom šire samo u cijevi, t. j. duž crte. Tako se isto valovi na užetu šire duž crte. Kada pak kaplja kiše padne na mirnu površinu vode, pobudi se valovito gibanje, koje u površini napreduje na sve strane. Ako se spoje crtom sva mjesta u površini napreduje na sve strane. Ako se spoje crtom sva mjesta površine, u kojima je u određeni čas vertikalna elongacija jednaka, izlazi kružnica, kojoj je središte tamo, gdje je kaplja pala. Ta se kružnica zove „crta vala", a njezini se polumjeri zovu „zrake". — Kad bi se kugla, koja lebdi u vodi, periodski nadimala i smanjivala, širili bi se vodom uzdužni valovi na sve strane. Na kojojgod koncentričnoj kugli bila bi u određeni čas elongacija titranja svagdje jednaka. Te se koncentrične kugle zovu „plohe vala", a polumjeri zovu se i ovdje „zrakama".

Kad se valovi šire u crti, mogu oni prevaliti velike putove, a da im amplituda titranja ne oslabi. Kad se valovi šire u plohi, pa crte vala postanu sve dulje, energija se titranja razdijeli na sve veće krugove, te amplituda titranja opada. Slično vrijedi u još većem stepenu, kad se valovi šire na sve strane prostora.

245. Niz valova. Kad površinom morskom idu nizovi valova, zovemo najviša mjesta valova bregovima, najdublja dolovima. Iste nazive primjenjujemo kod niza transverzalnih ravno polarizovanih valova; ako dugačkim užetom ide takav niz, te uže u kojigod čas imade oblik zmijolike krivulje (sl. 289.), ime se „brijeg" daje mjestima najveće elongacije jednoga smjera (na pr. točke a, b, ...), ime „dol" mjestima najveće elongacije suprotnog smjera (točke c, ...). Kad se točki sredstva približuje brijeg ili dol vala, elongacija raste; kad je brijeg ili dol preko točke prevalio, elongacija pada. Razmak od brijega do najbližega susjednoga brijega zove se dužina vala, a bilježi se ta veličina obično grčkim slovom λ. Kad se niz valova pomakne za dužinu λ, stupio je na mjesto brijega u točki b slijedeći brijeg; točka je dakle b nanovo došla do najveće elongacije, ona je izvela potpun titraj. Prema tome se u vremenu jednoga titraja T sek niz valova pomakne za dužinu λ cm. Neka je c cm/sek brzina, kojom niz valova napreduje. Onda će se u T sek niz pomaći za $c \cdot T$ cm, pa je dakle



Sl. 289.

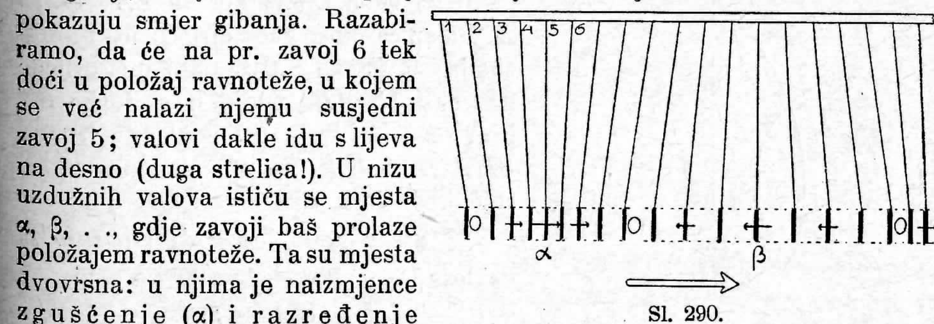
$$\lambda = c \cdot T.$$

Ta se osnovna jednadžba nauke o valovima može bilježiti još i u obliku

$$\lambda = c/n$$

gdje je n frekvencija (v. § 239.).

Pojam dužine vala uvodi se i kod uzdužnih valova. U slici 290. neka usporedne crte označuju zavoje Weinholdova valostroja; tanji pravci, što spajaju te crte s točkama 1, 2, 3, 4 . . ., jesu niti, na kojima zavoji vise. Slika prikazuje širenje niza valova u tom stroju. Zavoji, koji su u najvećoj elongaciji, imaju brzinu 0, pa je kod njih i zabilježena 0. Kratke strelice pokazuju smjer gibanja. Razabiramo, da će na pr. zavoj 6 tek doći u položaj ravnoteže, u kojem se već nalazi njemu susjedni zavoj 5; valovi dakle idu s lijeva na desno (duga strelica!). U nizu uzdužnih valova ističu se mjesta α, β, . . ., gdje zavoji baš prolaze položajem ravnoteže. Ta su mjesta dvovrsna: u njima je naizmjence zgušćenje (α) i razređenje (β). Razmak između dva susjedna zgušćenja ili dva susjedna razređenja zove se dužina vala, za tu veličinu vrijedi i ovdje gornja osnovna formula.



Sl. 290.

Kad sredstvom prolazi niz valova, čestice izvode redom mnogo titraja. Ima valovitih pojava, gdje čestice načine makar samo 1 titraj ili još manje. To vrijedi na pr. za površinu vode, kad je uzdrma val, što ga učini lađa. — U ušću nekih rijeka plima ulazi diskonti-

nuitetom (to u matematici znači, da se neka veličina mijenja „skokom“); prijelaz niske vode na visoku ima od prilike oblik stube, makar metar visoke i još više; ta se stuba proteže preko rijeke od jedne obale do druge i napreduje uz rijeku. (Taj se pojav zove engleski bore, francuski mascaret.)

246. Valovi vode. O valovima vode još ćemo reći ovo. Ima valova vode, koji ojednako pokreću svu masu vode od površine do dna. Pri tom se čestice vode pomiču u glavnom vodoravno u smjeru širenja. Takvi su valovi plime. Dva vala mjesečeve plime obilaze oko Zemlje. Sile, što podržavaju to valovito gibanje, jesu privlačenje, kojim djeluje Mjesec, i sila teža. Brzina pomicanja tih valova ista je kao i brzina prividnoga obilaženja mjesečeva, pa su ti valovi primjer „prisilnog“ valovitog gibanja. Kad bi najedamput nestalo mjesečeve sile, valovi bi plime nastavili svoje putove s drugim brzinama (manjim), jer bi se širili kao „slobodni“ valovi pukim utjecajem sile teže. Takvi se slobodni valovi šire u kanalu duboku a met brzinom $\sqrt{9{\cdot}8 \cdot a}$ m/sek (Lagrange 1781.). Amo idu i valovi od vulkanskih provala; kod provale vulkana Krakatau 1883. prošao je svima oceanima val, koji je imao u Capetownu visinu $^1/_4$ m. — I valovi površine vode, koji su dugi i njišu lađe, podržavaju se djelovanjem sile teže. Pri tom se dulji valovi šire brže. Sila, što izvodi najsitnije valove u površini, jest napetost površine. — Kad se vodom širi zvuk, voda se zgušćuje i razrjeđuje. Valovi se tada šire silom elastičnosti.

247. Odbijanje valova. Ako jedan kraj uzvojnice valostroja predočenoga u sl. 288. udarimo u smjeru uzvojnice, val će proći uzvojnicom do drugoga kraja, tamo će se „odbiti“ i kad se vrati k prvom kraju, taj će se nanovo zanjihati. 1.) Ako je drugi kraj učvršćen, val će se povratiti kao udarac protivnoga smjera; 2.) ako je drugi kraj „slobodan“, val će se povratiti kao udarac istoga smjera.

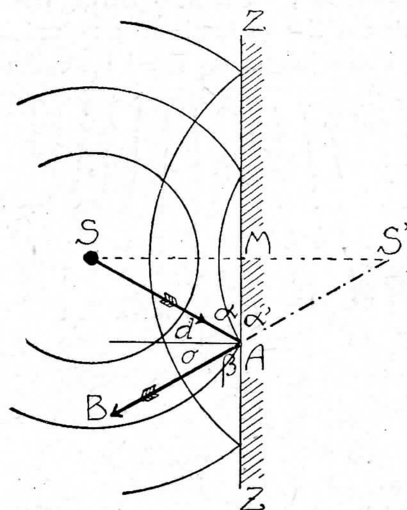
Kako se odbijaju valove crte, koje se šire u plohi? Ako kamen padne u vodu u točki S blizu obale ZZ sl. 291., koja je ravna, nastat će od valovih crta (krugova) odbijanjem opet krugovi, kojima je središte S', a ta je točka simetrična sa S s obzirom na ZZ. — Ta se činjenica može geometrijski još i drukčije izreći. Zraka SA iza odbijanja prijeđe u zraku $(S')AB$. Spoje li se točke SS' pravcem, dobivaju se sukladni trokuti $SMA \cong S'MA$ (zašto?). Iz sukladnosti slijedi, da je u slici

$\alpha = \alpha'$, zatim je $\beta = \alpha'$ (vršni kutovi), dakle je $\beta = \alpha$, $90^0 - \beta = 90^0 - \alpha$ ili

$$o = d;$$

riječima: *kut je odraza = kutu doraza.* (Isp. nazivlje u § 35.)

Sasvim slično vrijedi, kad se odbijaju kuglaste valove plohe na ravnoj stijeni.

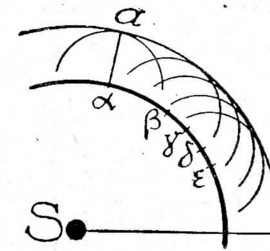


Sl. 291.

Točka S' zove se u nauci o svjetlosti slikom točke S, pa je možemo zvati slikom i kod drugih pojava valova.

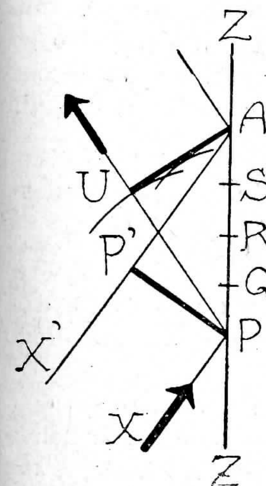
248. Huygensovo načelo. U predašnjemu se § reklo, kako se val odbija. Huygens je objasnio (1678.)[1]), zašto se tako odbija. U čemu stoji Huygensovo načelo (princip), pokazat ćemo na primjeru.

Neka se oko točke S, gdje je kamen pao u vodu, raširi val u obliku kružnice $\alpha\beta\gamma\delta$ (sl. 292.). Kako se u svakoj točki te kružnice sredstvo uzdrmalo, možemo pomisliti, da je svaka ta točka ishodište, iz kojega se šire zasebni valovi opet u kružnicama. Djelovanje se svih tih „elementarnih valova“ sastavlja, pa se dobije rezultujući val za koji kasniji čas. Neka se u 1 sek oko točaka α, β, γ, δ . . . . rašire elementarne valove crte s polumjerom $\alpha\, a$; iskustvo kazuje, da se polumjer rezultantne valove crta iza 1 sek povećao za $\alpha\, a$; dakle rezultantna valova crta dotiče sve elementarne valove crte.



Sl. 292.

Neka na ravnu obalu ZZ udari valova crta PP' (sl. 293.). Ta je crta uzeta kao komadić pravca, a možemo je shvatiti kao kratak luk velike kružnice; okomice XP, $X'P'$ jesu zrake. Od časa, kad val u točki P zgodi obalu ZZ, počinje se oko P širiti elementarna valova crta, t. j. kružnica, kojoj je središte P. Dok onda val stigne i u točku A obale, zraka je $X'P'$ prevalila put $P'A$, a polumjer je spomenutoga elementarnoga vala narastao do vrijednosti $PU = P'A$. Oko točke A baš se sada počinje širiti elementarni val (polumjer $= 0$). Središtima Q, R, S . . ., između P i A pripadaju elementarni valovi sve manjih polumjera. Crta, koja dotiče sve te elementarne valove, jest AU. To je dakle valova crta iza odbijanja, a njezine okomice (na pr. PU) jesu odbijene zrake. Budući da je trokut $APU \cong PAP'$ (zašto?), bit će PU i $P'A$ jednako priklonjeni prema obali ZZ, pa je s time zakon odbijanja objašnjen.



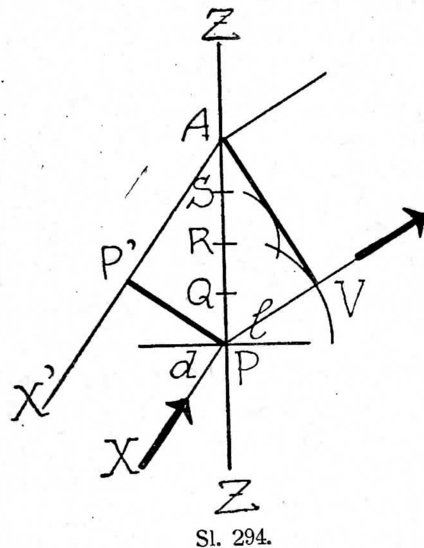
Sl. 293.

Kad se valovi šire na sve strane u prostor, tako da su valove plohe kugle, onda su i elementarni valovi kugline plohe. Nije sada teško u misli primijeniti Huygensovo načelo, dok bi samo izvođenje geometrijske crtnje, koja tome pripada, bilo dosta nepriličnо. Izlazi opet spomenuti već zakon.

[1]) „Traité de la lumière“ (= „Djelo o svjetlosti“) 1690.

249. Zakon loma. Neka je ravna površina pravcem ZZ razdijeljena u dva dijela (sl. 297.). U jednom dijelu ili sredstvu neka se valovi šire brzinom c; u drugom brzinom c'. Valova se crta na granici ZZ l o m i. Da nađemo zakon loma, zamislimo opet u prvom sredstvu valovu crtu PP' i zrake XP, $X'P'$ kao u pređašnjem §. Od časa, kad je točka P valove crte zgodila granicu, počinje se oko P kao središta širiti u drugom sredstvu elementarni val. Dok još i zraka $X'P'$ prevali put $P'A$ do granice, polumjer je spomenutoga elementarnog vala narastao do veličine PV, za koju vrijedi

$$P'A : PV = c : c'.$$



Sl. 294.

Oko točke A baš se sada počinje širiti elementarni val; a valovi, što su se raširili oko središta Q, R, S . . ., imadu to manje polumjere, što su te točke bliže točki A. Sve te elementarne valove tiče crta AV, koja je prema tome lomljena valova crta. Njezina je okomica PV l o m l j e n a z r a k a. Kut d, što ga zraka prije loma čini s okomicom podignutom na granicu, zove se i ovdje kut doraza; kut l, što ga zraka poslije loma čini s okomicom, zove se „k u t l o m a". Iz trokuta APP' i APV slijedi, da je

$$P'A = PA \sin d,\ PV = PA \sin l;$$

pređašnji razmjer može se dakle pisati

$$PA \sin d : PA \sin l = c : c'$$

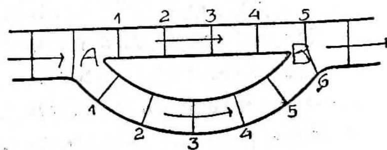
ili

$$\sin d / \sin l = c / c'.$$

To je zakon loma; on nam veli, da je o m j e r s i n u s a k u t a d o r a z a i s i n u s a k u t a l o m a s t a l n a v e l i č i n a, kolik god mu drago bio kut doraza.

I taj zakon vrijedi jednako za valove u prostoru kao i za valove u površini.

250. Sastavljanje valova. Kada se sredstvom šire valovi, koji dolaze iz različitih mjesta, oni se redovno ne smetaju. Kružnice, što nastaju, kad kapljice padaju na površinu vode, presijecaju se i ne mijenjaju pri tom svoga oblika; uho razaznaje u isti čas zvukove raznih glazbala, jer se nizovi zvučnih valova u uzduhu ne smetaju. Kad istodobno kroz neko mjesto sredstva prolazi

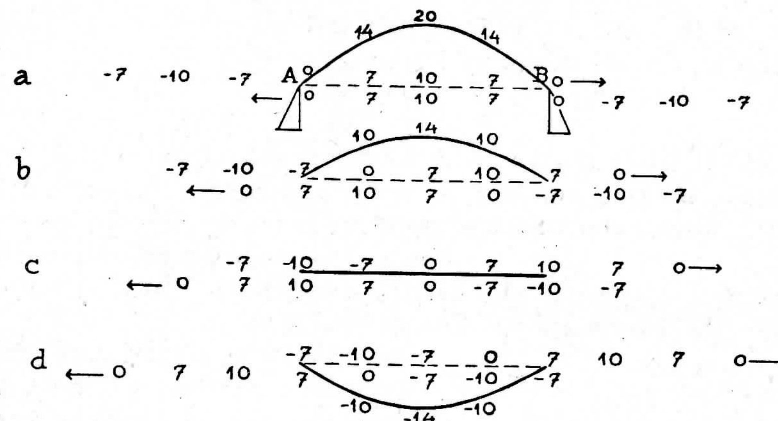


Sl. 295.

više valova, kažemo da valovi i n t e r f e r i r a j u (t. j. stupaju jedni među druge, starofranc. *entreferir*).

Kanalom, koji se kod A razgranjuje (sl. 295.), neka putuju valovi vode smjerom strelice (crta okomita na strelicu znači brijeg vala); iza razgranjenja valovi se u B sastanu, pa će interferirati. Ako je jedna grana dulja od druge, može se desiti, da se brijeg vala u nizu, što dođe iz jedne grane, sastane s dolom u nizu, što je došao iz druge grane; u takvom će se slučaju valovi interferencijom o s l a b l j i v a t i ili ća uništiti. To se događa, ako jedan niz za drugim zaostane za $1/2$ dužine vala t. j. $\lambda : 2$ ili za $3\lambda : 2$ ili za $5\lambda : 2$ i t. d. Nizovi će se valova p o j a č a v a t i, ako se brijeg sastane s brijegom, dô s dolom; to se događa, ako jedan niz za drugim zastane za putove 0, λ, 2λ, 3λ i t. d.

251. Stojni valovi. Napeto uže ili žica mogli bi titrati ovako. Svaka točka užeta izvodi jednostavno titranje, a vremena se titraja i faze njihove za sve točke podudaraju; uže imade u kojigod čas oblik luka sinusoide, pa je amplituda titranja najveća za srednju točku žice, dok su krajne točke A i B trajno na miru. Sl. 296. a, b, c, d pokazuje oblik užeta u razmacima $1/8\ T$. (Ako žicu trzamo, ili ako na njoj gudimo, titranje je zamršenije).



Sl. 296.

Za tu vrst gibanja možemo pomišljati, da nastaje sastavljanjem dvaju sasvim jednakih nizova valova, što idu suprotnim smjerovima. Predočit ćemo svaki niz brojkama, koje znače elongacije za mjesta, što su razmaknuta za $\lambda : 8$. Neka dakle ide slijeva nadesno niz valova

$$\ldots -7\ \ -10\ \ -7\ \ \ 0\ \ \ 7\ \ \ 10\ \ \ 7\ \ \ 0\ \ldots$$

i isto takav niz zdesna nalijevo. Strelice u slici pokazuju smjer širenja

Elongaciju, što bi je točka užeta imala poradi jednoga niza, zbrojimo sa elongacijom, što bi je imala poradi drugoga niza; dobivamo rezultantnu elongaciju. Brojke, što su u sl. pobilježene pored elongacija, upravo su ti zbrojevi; brojke za komponentne nizove nalaze se iznad i ispod svakoga lika.

Kako je gibanje, što ga opisasmo, sastavljeno od dva valovita gibanja, zove se i samo valovitim gibanjem; ono je stojno valovito gibanje, jer brijeg vala ne putuje, već ostaje na mjestu, mijenja svoju visinu, pređe u dô i t. d. Točke, koje su pri stojnom valovitom gibanju na miru, zovu se čvorovi; točke, kojima je amplituda titranja najveća, zovu se trbusi. Vidimo, da je razmak od čvora do čvora jednak polovici dužine vala komponentnih nizova:

$$AB = \frac{\lambda}{2} \quad \text{ili} \quad AB = \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{n},$$

gdje je n broj titraja, c brzina širenja za svako komponentno titranje.

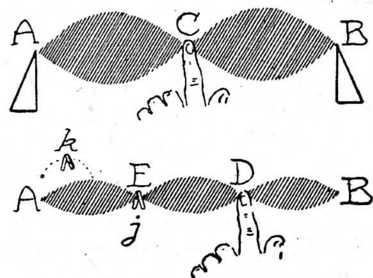
Još treba spomenuti, otkuda potječe niz valova, što od točke A ide prema B, a otkuda niz, što od B ide prema A. Prvi niz nastaje na kraju A odbijanjem drugoga niza, drugi nastaje na kraju B odbijanjem prvoga niza.

Što vrijedi za stojne valove na užetu, vrijedi i za kojegod druge stojne valove. Ima primjera, gdje se može odrediti svaka veličina u jednadžbi stojnih valova napose (AB, c, n), pa se tako utvrđuje, da je ta jednadžba valjana.

Ako užetu mijenjamo samo dužinu AB, a ne mijenjamo napetosti, brzina se c ne će promijeniti, pa je poradi

$$n = \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{AB}$$

broj titraja obrnuto razmjeran sa dužinom užeta. Na pr. ako uže skratimo na polovicu, broj se titraja podvostruči. Taj se zakon dade utvrditi pokusima, ako uzmemo uže dugačko mnogo metara, pa mu neposredno brojimo titraje (Mersenne 1640.). Kako kod njihala, ne zavisi ni ovdje broj titraja o amplitudi.



Sl. 297.

Ako napetu žicu dotaknemo prstom u sredini, gudalom stavimo u titranje, a onda prst uklonimo, žica će titrati tako, da će osim krajnjih točaka A i B još i sredina C mirovati (sl. 297. gore); ima dakle 3 čvora i 2 trbuha. Razmak je čvorova sada

$$AC = \frac{1}{2} AB = \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{n'},$$

gdje je n' broj titraja. Isporedi li se taj primjer s pređašnjim, dobiva se $\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{n} = \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{n'}$ dakle $n' = 2n$. Ako se prstom žica pritisne kod D, tako da je dio $BD = {}^1/_3\, AB$, i gudimo na kraćem dijelu žice, nastaje titranje sa 4 čvora A, E, B, D (sl. 297. dolje). Razmak je čvorova

$$AE = {}^1/_3\, AB = {}^1/_2 \cdot c/n'',$$

gdje je opet n'' broj titraja. Sada je

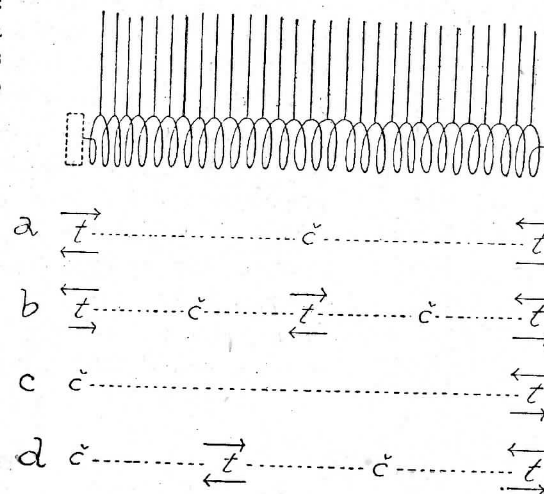
$${}^1/_3 \cdot {}^1/_2 \cdot c/n = {}^1/_2 \cdot c/n'' \text{ dakle } n'' = 3n.$$

Prema tome ako neka žica titra redom sa 2, 3, 4 . . . čvora, broj je titraja n, $2n$, $3n$ . . . Gdje je čvor, kazuje pokus, ako na žicu porazmjestimo papirnate „jahače"; na čvoru će jahač j ostati, dok će sa trbuha jahač k odskočiti (Sauveur).

252. Primjeri stojnih valova. I. Longitudinalni se stojni valovi lako mogu pokazati na Weinhold-ovu valostroju (§ 244.). Njegova se uzvojnica može pobuditi na kojegod od ovih titranja:

A) kad su oba kraja slobodna: 1. 1 čvor (u sredini), 2 trbuha (na krajevima); krajevi se u isti čas sredini približuju, a onda istodobno od nje udaljuju (sl. 298. a); 2. 2 čvora, 3 trbuha (sl 298. b); i t. d.

B) kad je jedan kraj učvršćen: 1. 1 čvor (na čvrstom kraju), 1 trbuh (na slobodnom kraju) (sl. 298. c): 2. 2 čvora, 2 trbuha (sl. 298. d); i t. d.



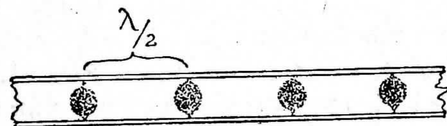
Sl. 298.

U čvoru se izmjenice zavoji stisnu i raziđu, dok se u trbuhu razmak zavoja ne mijenja.

II. Kod ovećih se jezera opažaju zibanja, koja su ispitana najprije kod Ženevskoga jezera (Forel 1875.). Najjednostavniji je primjer, da voda na jednom kraju jezera (kod grada Ženeve) izmjenice raste i pada, dok u isto vrijeme na drugom kraju pada i raste. Sva je masa vode u gibanju, pa se nivo sredine jezera ne mijenja. Jedan njihaj traje 73 min. Što se visine vode tiče, može se reći, da je čvor titranja u sredini jezera, dok su trbusi na krajevima. U stvari je znatnije da se obazremo na pomicanje vode smjerom dužine jezera; no horizontalna je komponenta gibanja vode najveća u sredini jezera, dok je na krajevima $= 0$; s toga se gledišta može reći, da zibanje jezera ima 2 čvora (na krajevima) i 1 trbuh (u sredini).

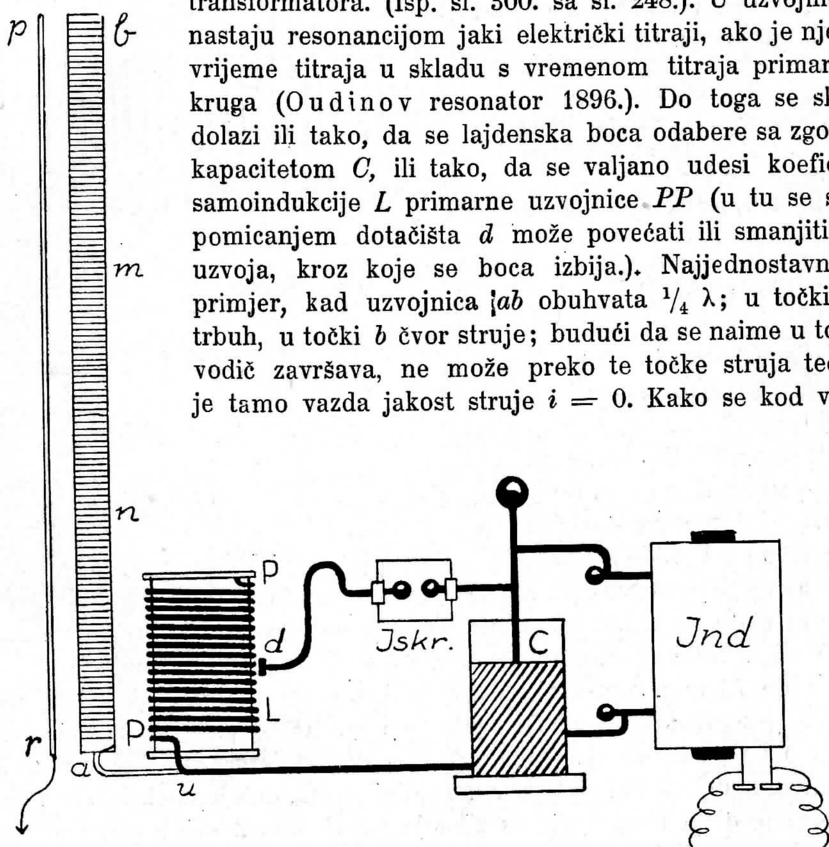
III. Stojni valovi uzduha u cijevi nalikuju valovima uzvojnice valostroja. Primjer, kad je jedan kraj cijevi zatvoren, naliči primjeru, kad je jedan kraj uzvojnice učvršćen. Ako se u cijevi nalazi koja fina prašina (likopodij,

kremična kiselina), ona se namješta u hrpe prema pravilnom razmještaju čvorova, pa iz likova prašine razabiramo, kolik je razmak čvorova (Kundtovi likovi 1870., sl. 311.).



Sl. 299.

IV. Stojni valovi električke struje dadu se očigledno prikazati na Seibtovoj uzvojnici (1902.). Na vrlo dugom štapu *ab* (sl. 300.) na tijesno je namotan jedan sloj izolirane tanke bakrene žice u mnogo zavoja. Jedan je kraj *a* uzvojnice spojen s točkom *u* primarne uzvojnice Teslina transformatora (§ 211.), pa uzvojnica *ab* upravo nadomješta sekundarnu uzvojnicu toga transformatora. (Isp. sl. 300. sa sl. 248.). U uzvojnici *ab* nastaju resonancijom jaki električki titraji, ako je njezino vrijeme titraja u skladu s vremenom titraja primarnoga kruga (Oudinov resonator 1896.). Do toga se sklada dolazi ili tako, da se lajdenska boca odabere sa zgodnim kapacitetom *C*, ili tako, da se valjano udesi koeficijent samoindukcije *L* primarne uzvojnice *PP* (u tu se svrhu samoindukcija *L* može povećati ili smanjiti broj pomicanjem dotačišta *d* može povećati ili smanjiti broj uzvoja, kroz koje se boca izbija.). Najjednostavniji je primjer, kad uzvojnica *ab* obuhvata $1/4$ λ; u točki *a* je trbuh, u točki *b* čvor struje; budući da se naime u točki *b* vodič završava, ne može preko te točke struja teći, te je tamo vazda jakost struje $i = 0$. Kako se kod valova



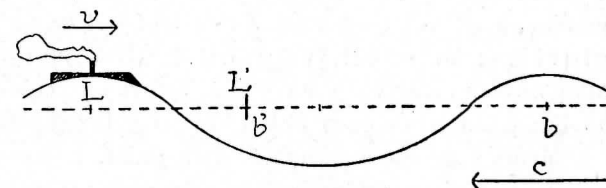
Sl. 300.

na Weinholdovu valostroju u čvoru mijenja gustoća, tako se i ovdje na kraju *b* mijenja električka gustoća; a s gustoćom mijenja se i

električki potencijal, te ta veličina u čvoru koleba između velikih skrajnih vrijednosti. Do uzvojnice *ab* stoji uporedo ravna žica *pr*, koja je spojena sa zemljom, te ima potencijal zemlje. Gdje je dosta velika razlika potencijala između uzvojnice *ab* i zemlje, izbijat će iz uzvojnice elektricitet u svjetlom pramenu prema žici *pr*, pa ćemo (u tmini) tu svjetlost osobito dobro vidjeti kod čvora. — Ako vrijeme titraja dosta smanjimo, izaći će zamršenije titranje; uzvojnica onda obuhvata na pr. $3/4$ λ sa dva čvora (kod *b* i *n*). — Još manje treba da je vrijeme titraja, kad hoćemo dobiti 3 traka svjetlosti i t. d.

Zad. **179.** Koji se pojavi mogu dobiti kod Seibtove uzvojnice, ako je krajnja točka *b* spojena sa zemljom?

253. Dopplerov pojav. Ako lađa ide baš ususret valovima, prođe ispod nje u 1 minuti više valova nego što bi prošlo, kad bi lađa mirovala. Neka je lađa *L* baš na brijegu vala (sl. 301.), slijedeći brijeg neka je u taj čas u točki *b*, tako da je $Lb = \lambda$. S tim brijegom neka se sastane lađa *x* min kasnije i to u točki *L'* ili *b'*. Ako je brzina lađe *v* m/min, brzina valova *c* m/min, bit će



Sl. 301.

$$LL' = v \cdot x, \qquad b'b = c \cdot x.$$

Kako je
$$\lambda = LL' + b'b,$$
dobiva se
$$\lambda = c \cdot x + v \cdot x.$$

Ako se mirna lađa susreće sa *n* bregova u min, a lađa u gibanju sa *n'* bregova, bit će

$$\lambda = c/n \qquad n' = 1/x.$$

Pređašnja dakle formula prelazi u

$$c/n = c/n' + v/n',$$

a odatle slijedi jednadžba, koja veže pravi broj titraja *n* (broj titraja vode) sa prividnim brojem titraja *n'* (broj titraja lađe):

$$n' = (1 + v/c)\, n.$$

Ako lađa miruje, prividni je broj titraja isti kao i pravi; doista za $v = 0$ izlazi iz formule $n' = n$. Ako lađa uzmiče pred valovima s onolikom brzinom, kolikom se valovi šire, treba staviti $v = -c$; onda formula daje $n' = 0$; lađa ostaje uvijek na istom mjestu vala, pa je val ne njiše.

Umjesto da se onaj, koji motri valove, giblje, možemo zamisliti, da miruje, ali da mu se izvor valova primiče. I onda će motrilac nabrojiti više titraja u min, nego što u izvoru u tom vremenu nastaju. Ako li se pak izvor valova udaljuje, prividni je broj titraja manji od prvoga.

Da su te činjenice znatne za nauku o zvuku i nauku o svjetlosti, opazio je Doppler (1842.), pa se mijenjanje broja titraja, što nastaje bilo gibanjem motrioca bilo gibanjem izvora svjetlosti, zove Dopplerov pojav.

Zad. 180. Morski valovi, koji vodu zanjišu 10·6 puta u minuti, putuju brzinom 8·8 m/sek (njihova je dužina 50 m); sa koliko se valova u minuti sretne lađa, koja plovi brzinom 10 m/sek a) ususret valovima, b) smjerom valova?

[a) 22·7 u min, b) 1·5 u min]

2. Nauk o zvuku

254. Priroda zvuka. Pojavi, što ih uhom zamjećujemo, zovu se zvuk, nauka o zvuku akustika (ἀκούω, *čujem*). Već je na osvitku fizike bilo ljudi, koji upoznaše, da su pojavi, što u nas bude oćut zvuka, mehanički pojavi (Aristotele). Drugi opet mišljahu, de je zvuk neka osobita tvar, koja se na sve strane širi od tijela, koje zvuči. No prva je pomisao naskoro prevladala, pa su već u starom vijeku kao i danas pomišljali, da se zvuk širi valovima; Vitruvij (Vitruvius, 1. vijek poslije Kr.) ispoređuje širenje zvuka kružnim valovima na vodi. Valovi se zvuka šire uzduhom, ulaze u uho i u njem bude oćut zvuka. Ti su valovi uzdužni.

Među zvucima odlikuju se tonovi t. j. zvuci, što ih uho drži pravilnima i čistima (τόνος, *napinjanje, ton*). Dva se tona mogu razlikovati 1. visinom, 2. jakošću i 3. t. zv. bojom. Što je razlika u boji, razabiramo, ako ton određene visine izvodimo jedamput glasovirom, drugi put guslama; koliko se god trsili, da oba tona budu i jednako jaka, ipak jasno opažamo razliku i po tonu upravo prepoznajemo glazbalo. Treba ispitati, koje fizikalne činjenice pripadaju spomenutima razlikama naših oćuta. Jakost tona stoji do amplitude titranja u valovima, što zgađaju uho. Ako snažno udarimo tipku na glasoviru, točke će žice titrati s velikom amplitudom, pa će isto vrijediti i za čestice uzduha i čut ćemo jak ton. S visinom tona amplituda nema sveze, jer udarajući jako ili slabo na tipku dobivamo ton jednake visine.

O visini i boji tona isp. naredne §§.

255. Intervali. U većine je ljudi sluh dosta osjetljiv, da s nekom sigurnošću umiju reći, jesu li dva tona iste visine ili nisu. Tako isto lako prosuđujemo, jesu li valjani razmaci tonova u napjevima. Razmaci tonova ili intervali (lat. *intervallum, razmak*) imadu u nauci o glazbi osobita imena. Najznatniji su intervali oktava i kvinta; ime im je odatle, što je u t. zv. diatoničkoj ljestvici (isp. slijedeći §) oktava razmak 1. i 8. tona (lat. *octavus, osmi*), a kvinta razmak 1. i 5. tona (*quintus*). Sklad tonova, koji su u razmaku oktave, tako je potpun, da ljudi neizvježbani gdjekada ne znaju, jesu li dva tona različitih glazbala iste visine ili im je razmak oktava. Što se čistoće kvinte i oktave tiče, uho je osobito osjetljivo.

Odavna je poznato, da kratka žica daje viši ton negoli duga. Već je Pitagora znao (Πυθαγόρας, 5. vijek pr. Kr.), kakvi omjeri dužina žice pripadaju određenim intervalima. Poimence mu je bilo poznato, da skraćujući

žicu na polovicu povisujemo ton za oktavu, a skraćivanjem na $^2/_3$ povisujemo za kvintu. Prema tome vrijede razmjeri:

dužina žice : duž. žice s tonom za oktavu *višim* = 2 : 1
dužina žice : duž. žice s tonom za kvintu *višim* = 3 : 2.

Računi, što su ih grčki teoretici s takvim omjerima izvodili, unapredili su i razvoj aritmetike. No izmakla je Grcima spoznaja, da ti isti omjeri kazuju i to, koliko je puta broj titraja višega tona veći od broja titraja dubljega tona. Doista se u § 251. pokazalo, da je broj titraja žice (užeta) obrnuto razmjeran dužini žice, pa možemo pisati:

broj titraja : broj titraja kod tona za oktavu *višeg* = 1 : 2
broj titraja : broj titraja kod tona za kvintu *višeg* = 2 : 3.

Omjer brojeva titraja, što pripada nekom intervalu, može se i tako bilježiti, da se veći omjerni broj stavi ispred manjega, pa je na pr. interval kvinte izražen bilo omjerom 2 : 3 bilo omjerom 3 : 2.

256. Glazbena ljestvica. Ponajznatniji niz tonova, što služe gradnji glazbenih skladbi, jest t. zv. dur-ljestvica ili dur-skala (lat. *scalae, ljestve*). U razmaku jedne oktave ona obuhvata 8 tonova, kojima brojevi titraja stoje u omjerima:

24 : 27 : 30 : 32 : 36 : 40 : 45 : 48.

Kad iz toga složenoga omjera uzmemo pojedinačke omjere, možemo ih skratiti, pa u skladu s onime, što se prije reklo, izlazi omjer za kvintu 24 : 36 ili 2 : 3, a za oktavu 24 : 48 ili 1 : 2. Kvarti pripada omjer 24 : 32 ili 3 : 4, terci 24 : 30 ili 4 : 5, seksti 24 : 40 ili 3 : 5.

Područje se tonova toga niza proširuje tako, da svakom tonu dodamo ton za 1, 2, 3 i t. d. oktave viši ili dublji i sve tonove poređamo po visini.

Tonovi se označuju osobitim imenima, pa tonovi, kojih je interval oktava ili više oktava, dobivaju isto ime. Ako se prvi ton dur-ljestvice prozove imenom „*c*“, onda se tonovi te ljestvice redom zovu

c d e f g a h c

(čit. „ce“, „de“ i t. d.; slovo *h* stavilo se umjesto *b*, jer je gotsko slovo *b* naličilo na *h*; ako se dakle opet *h* nadomjesti sa *b* i niz tonova započne kod „*a*“, slova slijede abecednim redom; uostalom u engleskoj glazbi slovo „*b*“ i danas imade svoje prvobitno značenje). Označivanje tonova slovima potječe iz početka srednjega vijeka; druga su imena tih tonova:

ut re mi fa sol la si ut;

to su prvi slogovi stihova neke latinske pjesme iz 11. vijeka.

Niz omjernih brojeva dur-ljestvice nije samovoljno nabačen, kako bi se u prvi mah moglo misliti. Možemo ga dobiti oslanjajući se na tri osnovna intervala: oktavu, kvintu i tercu. Služeći se njihovim omjernim brojevima pisat ćemo brojeve za cijelu ljestvicu

24 : *d* : 30 : *f* : 36 : *a* : *h* : 48,

gdje slova *d, f* . . . znače brojeve, što pripadaju tonovima *d, f* . . . Ovdje se uz oktavu ističe još i dur-trozvuk 24 : 30 : 36 ili 4 : 5 : 6. Proširimo sada ljestvicu tonovima, koji su za oktavu viši ili dublji:

f/2 : 18 : *a*/2 : *h*/2 : 24 : *d* : 30 : *f* : 36 : *a* : *h* : 48 : 2*d*;

sada pak odredimo, da se na trozvuk 24 : 30 : 36 nadovezuje „odozgo“ i „odozdo“ jednak trozvuk, tako da je

$$36 : h : 2d = 4 : 5 : 6$$
$$f/2 : a/2 : 24 = 4 : 5 : 6.$$

Odatle se izračunava $d = 27$, $f = 32$, $a = 40$, $h = 45$.

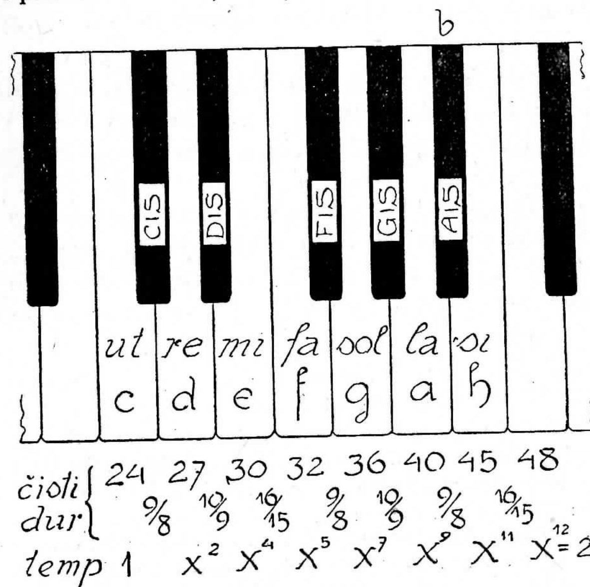
Da dur-ljestvicu dobro upoznamo, treba još ispitati, u kojima omjerima stoje brojevi titraja susjednih tonova. Ti su omjeri

	27 : 24	30 : 27	32 : 30	36 : 32	40 : 36	45 : 40	48 : 45
ili skraćeno:	9 : 8	10 : 9	16 : 15	9 : 8	10 : 9	9 : 8	16 : 15.

Intervali 10 : 9 i 9 : 8 nisu baš mnogo različni i zovu se „cijeli tonovi“, gdje naziv „ton“ dolazi kao oznaka intervala. Prvi je interval nešto manji od drugoga, pa interval 9 : 8 zovemo veliki cijeli ton, a interval 10 : 9 mali cijeli ton. Znatno je manji interval 16 : 15, pa se zove „poluton“. Razlika između cijeloga tona i polutona zorno se ističe kod orgulja i glasovira, gdje između bijelih tipaka s razmakom polutona nema crne tipke (*e—f*, *h—c*) (sl. 302.). Ljestvica, kojoj susjedni tonovi od veće česti čine interval cijeloga tona, zove se „diatonička“ (διά, *kroz*). Prema tome je i dur-ljestvica diatonička.

Budući da je $\frac{16}{15} \cdot \frac{16}{15} = 1{\cdot}138$, a $\frac{9}{8} = 1{\cdot}125$, to je interval velikog cijelog tona približno jednak dvjema intervalima polutona. Prema tome u razmaku oktave imademo krupno uzeto 12 intervala polutona, kako se lako brojenjem na glasoviru (sl. 302.) razabira; kvinta pak obuhvata 7 polutonova. Prema tome je 7 oktava = 7 · 12 = 84 polutona, a isto tako je 12 kvinta = 12 · 7 = 84 polutona. Dakle je razmak od 12 kvinta približno jednak razmaku od 7 oktava (Aristoksen, Ἀριστόξενος, oko 350. pr. Kr.).

Pitagorejska ljestvica kreće se samo koracima velikoga cijeloga tona 9 : 8 i polutona 256 : 243; do nje se dolazi uzimljući za osnov samo interval oktave i kvinte.



Sl. 302.

Drže, da je bila vrlo prikladna za starinsku jednoglasnu glazbu, naročito za izvođenje melodije bez pratnje.

Ako je na glasoviru valjano udešena dur-ljestvica, koja počinje s tonom *c*, t. j. c-dur-ljestvica, ne možemo izvoditi dur-ljestvice, koja bi počela s kojim drugim tonom. Doista, kad bismo sada htjeli ton *d* uzeti za prvi ton ljestvice, morao bi prvi korak u toj ljestvici (pomak *d-e*) iznositi veliki cijeli ton, dok je taj razmak udešen na mali cijeli ton. Iza toga trebalo bi u drugom koraku pokročiti za cijeli ton, no na glasoviru sada slijedi interval poluton. I t. d. Da se ukloni ta neprilika, umetnute su crne tipke *cis*, *dis*, *fis*, *gis*, *ais* ili *b* (sl. 302.), te je svaki interval cijelog tona razdijeljen u dva intervala, koji su približno jednaki polutonu. Početak je d-dur-ljestvice onda *d*, *e*, *fis*, *g* . . . Povrh toga se kod udešavanja nijedna ljestvica ne udesi sasvim čisto, već se sve jednako čistoći približuju. To se postizava po ovome propisu: interval susjednih tonova načini se svagdje jednak. Ako je dakle broj titraja tona *cis* x puta veći od broja *c*, onda treba da je i broj titraja tona *d* x puta veći od broja titraja tona *cis*, t. j. x^2 puta veći od broja titraja tona *c* i t. d. Tako izlazi ljestvica temperirana

c	*cis*	*d*	*dis*	*e*	*f*	*fis*	*g*	*gis*	*a*	*ais*	*h*	*c*	s omjernim brojevima
1	x	x^2	x^3	x^4	x^5	x^6	x^7	x^8	x^9	x^{10}	x^{11}	x^{12}.	

Kako se i ovdje zahtijeva, da prvi i zadnji ton stoje u oktavi, izlazi

$$x^{12} = 2 \text{ ili } x = \sqrt[12]{2} = 1{\cdot}05946.$$

Temperirana je kvinta $x^7 = 1{\cdot}498$, čista kvinta 3 : 2 = 1·500, temperirana terca $x^4 = 1{\cdot}260$, čista terca 5 : 4 = 1·250. Temperirana je ljestvica počevši od 18. vijeka u glazbi gotovo općeno prevladala.

Imade naroda, koji u svojoj pučkoj glazbi do danas sačuvaše ljestvicu, koja u razmaku oktave nema 7 stepenica već samo 5 (na pr. Škoti, Kitajci i t. d.)

Zad **181.** Koji interval treba dodati kvinti 2 : 3, da se dobije oktava 1 : 2? (Pitagora.)

[kvarta 3 : 4]

Zad. **182.** Sagradite pitagorejsku ljestvicu po ovom naputku: od tona *f* (omjerni broj 1) načinite 6 koraka u kvintama (2 : 3) prema višim tonovima, a od dobivenih tonova pokročite — koliko treba — za oktave (1 : 2) prema dubljima.

$[{}^1/_2 \cdot {}^3/_2,\ {}^1/_4 \cdot ({}^3/_2)^3,\ {}^1/_8 \cdot ({}^3/_2)^5,\ 1,\ {}^1/_2 \cdot ({}^3/_2)^2,\ {}^1/_4 \cdot ({}^3/_2)^4,\ {}^1/_8 \cdot ({}^3/_2)^6]$

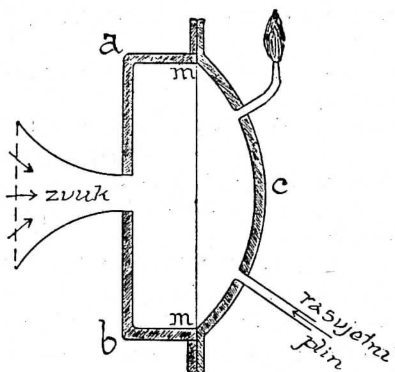
Zad. **183.** Koliko je puta veći broj titraja nekog tona od broja titraja tona, koji je za 7 oktava dublji, i od broja titraja tona, koji je za 12 kvinta dublji? [128 puta, 129·74 puta.]

257. Apsolutna visina tona. U pretprošlom se § objasnilo, kako se može na osnovu zakona titranja žice i uz pomoć sluha odrediti, koliko je puta broj titraja tona veći od broja titraja kojeggod dubljega tona, drugim riječima, koliki su „relativni“ brojevi titraja. Da se odredi „apsolutni“ broj titraja, t. j. koliko titraja u sek pripada izvjesnom tonu, možemo se služiti sirenom (*Sirene*, bića grčkoga mita). Sirena s rupicama (Cagniard de la Tour 1819.) može biti okrugla ploča, koja imade niz rupica poređanih u vijenac, koji je s pločom koncentričan. Ako se ploča poput kotača vrti, a duvamo kroz cijev na rupice, struja uzduha čas može, čas ne može prolaziti kroz rupice, nastaje izmjenice razređenje i zgušćenje uzduha i s time ton. Što je veća brzina vrtnje, to je ton viši. Hoćemo li nekom tonu odrediti broj titraja, mijenjamo brzinu vrtnje sirene dotle, dok se visina njezinoga tona podudara s visinom ispitivanoga tona. Ako sad znamo, kolika je brzina vrtnje, pa ako prebrojimo rupice, možemo broj titraja izračunati. Starija je „sirena sa zupcima“.

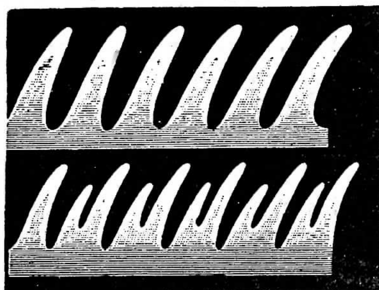
Ako poznajemo broj titraja nekoga tona, a drugi ton daje s prvim 5 udara u sek (§ 242.), bit će broj titraja drugoga tona za 5 titraja u sek veći ili manji. Je li jedno ili drugo, razabira se, ako udezbu drugoga tona sasvim malo povisimo.

Najbolji način određivanja broja titraja jest grafički način. Ako je na glazbenoj viljuški, kojoj želimo odrediti broj titraja, učvršćen šiljak i šiljak

bilježi titraje na plaštu valjka, koji se vrti, pa ako u isto vrijeme na tom valjku zgodna ura (**h r o n o g r a f**) bilježi sekunde, može se izbrojiti, koliko se titraja izvelo u jednoj sekundi. Prednost je toga postupka u točnosti, a i u tom, što oblik dobivene krivulje pokazuje, koji je zakon titranja. — Zakon titranja vidimo i kod K o e n i g o v i h m a n o m e t r i č k i h p l a m e n o v a (1872.). Kutija *abc* (sl. 303.) razdijeljena je elastičnom tankom stijenom *mm* (na pr. tinjac) u dva pretinca. Kroz jedan pretinac prolazi struja rasvjetnoga plina u plamenik, u drugi pretinac puštamo valove zvuka. Titranjem se uzduha pobudi na titranje i elastična stijena, pa se rasvjetni plin sgušćuje



Sl. 303.



Sl. 304.

i razrеđuje, te se visina plamena periodski mijenja. Ako motrimo plamen u zrcalu, koje se vrti (isp. § 224.), vidimo ga rastegnut u valovite slike (sl. 304.).

Uho čovječje nije baš osobito osjetljivo što se tiče apsolutne visine tona. Rijetki su ljudi, koji imadu „apsolutan sluh", t. j. koji umiju pogoditi visinu pojedinačnoga tona. Ipak je za glazbu važno, da se pripazi na apsolutnu visinu tona, jer jedna glazbala treba da su udešena prema drugima. Do nedavna vrijedio je propis, da ton *a*, koji se bilježi , treba udesiti na 435 titraja/sek (k o m o r n o *a*, francuski propis od g. 1859.). Umjesto toga prihvatila je jedna međunarodna konferencija držana u svibnju 1939. u Londonu predlog, da se za taj *a* propiše frekvencija **440.** Radio Königswusterhausen emitira taj isti „t o n z a u d e š a v a n j e" **440·000000** dnevice kroz nekoliko minuta počevši od 1. II. 1939. Iz iste aparature emitira taj radio još i „n o r m a l n u f r e k v e n c i j u" **1000·0000**0. Točnost je emitiranih frekvencija tolika, da je u napisanim brojevima samo zadnja decimala nepouzdana.

Čovječje uho ne osjeća svako titranje uzduha kao zvuk. Treba da bude bar kojih 16 titraja u sek ili najviše kojih 38000 titraja u sek. Izvan tih granica nema zvuka za čovjeka, a za većinu su ljudi granice zvuha mnogo tjesnije. — Glasovir obično obuhvata 7 oktava, tako da je najdublji ton *a* sa $435 : 2^4 = 27{\cdot}2$ titraja, a najviši ton *a* sa $435 \cdot 2^3 = 3480$ titraja. — Opseg je čovječjega grla do 2 oktave, a sopran i bas zajedno imadu do 4, izuzetno 5 oktava. Maleno područje oko tona, kojemu je broj titraja otprilike 300, zajedničko je svima grlima.

Zad. **184.** Dvije svirale dubokih tonova daju interval poluton (15 : 16), a kad zajedno zvuče, daju 6 udara u sek. Koliki su brojevi titraja? (S a u v e u r), [90, 96 u sek]

Zad. **185.** Žice su gusala udešene u razmacima kvinta; *a*-žica ima 435 titraja; koliki su brojevi titraja za obje dublje žice i za žicu s najvišim tonom? [$193^1/_3$, 290, (435), $652^1/_2$]

Zad. **186.** Koliko titraja pripada u temperiranoj ljestvici tonu *c*, koji je prvi *c* iznad komornoga *a*?

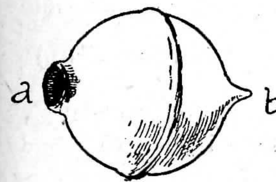
Zad. **187.** Sirena načini u minuti 1400 okreta, a ima 96 rupica; koliko litraja ima njezin ton? za koliko je oktava i koliko temperiranih polutonova taj ton viši od komornoga *a*? [2240 titraja/sek; 2 oktave i nešto više od 4 polutona]

Zad. **188.** Brzina je zvuka u uzduhu 340 m/sek; kolika je dužina vala za najdublji, kolika za najviši ton glasovira? [12·4 m, 9·8 cm]

258. Boja tona. U § 251 razložilo se, da žica može titrati sa 2 čvora, sa 3, sa 4 i t. d.; pri tom su brojevi titraja *n*, *2n*, *3n* i t. d. Svakomu broju titraja pripada osobit ton, pa te tonove zovemo redom o s n o v n i t o n žice, 1. g o r n j i t o n, 2. g o r n j i t o n i t. d. Prvi je gornji ton žice oktava osnovnoga tona, drugi je gornji ton kvinta prvoga i t. d. Ako je žica udešena na ton *c*, slijed je njezinih tonova

c	c′	g′	c″	e″	g″	b″	c‴
osnovni	1. gornji	2.	3.	4.	5.	6.	7.

Pomišljamo ovdje kao u § 251., da svaka točka žice titra j e d n o s t a v n o. no iskustvo je pokazalo, da obično žica titra z a m r š e n i j i m načinom. Za poimanje tog zamršenijeg titranja znatan je poučak više matematike, što ga je našao F o u r i e r, iz kojega izlazi, da se i vrlo zamršena titranja žice mogu pomišljati sastavljenima od j e d n o s t a v n i h titranja, kojima su frekvencije *n*, *2n*, *3n* i t. d. Onako kako se zamršena gibanja mogu matematički rastaviti u jednostavna titranja, tako i uho kojigod ton žice može rastaviti u jednostavni osnovni ton i jednostavne gornje tonove. Premda nam se dakle u prvi mah čini, da je ton žice jednostavan, redovno to nije tako, već je on sastavljen. Obično toga ne opažamo, jer su gornji tonovi, što su u složenom tonu sadržani, obično slabi; da lakše čujemo gornji ton, zgodno je, da ga na kojem pomoćnom glazbalu sama za se izvedemo, a onda puštamo da zvuči ton, kojem sastav ispitujemo. Pouzdano pomagalo za ispitivanje gornjih tonova jesu H e l m h o l t z o v i resonatori (1859.). To su šuplje kugle od žute mjedi ili stakla; imadu dva otvora (sl. 305.), jedan (*a*) propušta valove zvuka u



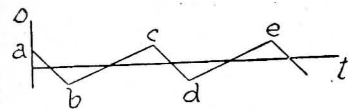
Sl. 305.

šupljinu resonatora, drugi (b) stavi se na uho, pa propušta valove iz resonatora u uho. Ako resonator jako zvuči, znak je, da je ton, na koji je resonator udešen, sadržan u ispitivanom složenom tonu.

Premda obično ne opažamo pojedinih tonova u složenom tonu, njihova se nazočnost ipak nama očituje, a očituje se u b o j i t o n a. Dva tona iste visine a različite boje fizikalno se razlikuju u tom, što su kod njih jednom i s t o m osnovnom tonu primiješani gornji tonovi r a z l i č i t i h jakosti.

Ako na isti ton pjevamo redom samoglasnike a i u, u oba je primjera osnovni ton isti, a razlika zvuka dolazi otuda, što su gornji tonovi različito jaki. Razlika je samoglasnika dakle razlika boje. Samoglasnici dadu se i oponašati. Dignimo poklopac glasovira i pritiskom pedala oslobodimo žice, da mogu titrati; onda zapjevajmo (na kojigod ton glasovira) samoglasnik a; čut ćemo kao odgovor isti taj glas. Na svaki jednostavni ton sadržan u glasu a resonira žica glasovira, koja je na nj udešena, tako da sve te žice zajedno daju i same taj samoglasnik. Samoglasnici mogu se i tako oponašati, ako puštamo, da u isti mah zvuče glazbene viljuške zgodno odabrane (H e l m h o l t z 1859.). Svaka viljuška pri tom izvodi j e d n o s t a v n o titranje. Istoj svrsi mogu poslužiti i š i r o k e zatvorene svirale.

Da u orguljama tonu neke svirale podamo izvjesnu boju, dodajemo posebnim sviralama gornje tonove onoga tona. Ako na pr. uzmemo izvjesni „pomoćni registar" i udarimo tipku c, ne će zvučiti svirala c, već na pr. svirala g', koja daje gornji ton svirale c. Ne bi dakle imalo smisla uzeti pomoćni registar sam za se, već ga valja upotrebiti samo u svezi s „glavnim registrom" (principal). Svirale pomoćnoga registra ne smiju da jako zvuče, da se ne bi njihov ton uhu nametnuo. Ako se uzme 5-struka „mikstura", kod svakoga će udarca tipke zvučiti uz svirale, koje daju osnovni ton, još 5 svirala udešenih na gornje tonove.



Sl. 306.

Ako ton žice izvodimo gudenjem, zakon je titranja za kojugod točku žice grafički predočen crtom poput slomljene crte $abcde$ u sl. 306., gdje su apscise t vremena, a ordinate s elongacije. Točka žice u vrlo kratak čas pređe iz jednolikoga gibanja jednoga smjera u jednoliko gibanje suprotnoga smjera. Takvo je gibanje matematički mnogo zamršenije od jednostavnoga titranja. — Opet je drugo titranje, kad žicu trzamo.

259. Titranje najznatnijih akustičnih sprava. I. Žica. Našli smo (§ 251.), da osnovni ton žice duge l cm ima broj titraja $n = c : 2\,l$. Ako je žica napeta silom P dina, a 1 cm žice ima masu K grama, onda je — kako pokazuje teorija — brzina valova na žici c jednaka $\sqrt{P : K}$ cm/sek. Ako je dakle žica napeta utezom P, možemo odrediti broj titraja žice iz formule

$$n = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{l}\sqrt{\frac{P}{K}} \qquad \text{(Taylor 1715.)}$$

Iz nje vidimo na pr., da napinjući žicu 4-strukom silom podvostručujemo frekvenciju, te povisujemo ton za oktavu. Jednako duge i jednako napete žice imadu to dublji ton, što je žica deblja.

Titranje se žice ispituje ponajstarijom fizikalnom spravom m o n o k o r d (μονόχορδος, *jedna žica*; P i t a g o r a).

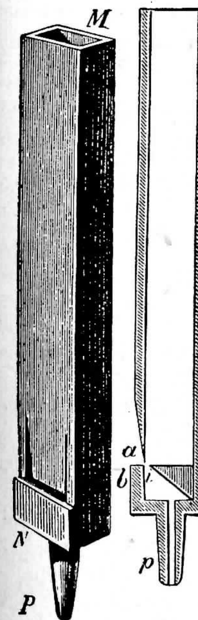
Zad. **189.** Na glasoviru žica za komorno a ima dužinu 40 cm; kojom se brzinom šire valovi na toj žici? [352 m/sek]

Zad. **190.** Žica je napeta silom 10 kg*; kolika treba napetost, da se ton povisi za kvintu? [$22\frac{1}{2}$ kg*]

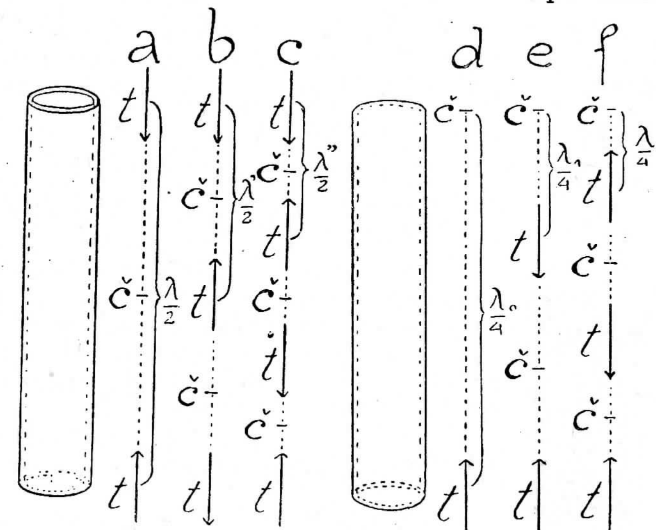
Zad. **191.** Na glasoviru žica duga 168 cm i debela 1·26 mm ima broj titraja 72·6 u sek; žica duga 4·8 cm i debela 0·85 mm ima broj titraja 3480 u sek; kolike su njihove napetosti, aka je gustoća žice (čelik!) 7·8 g/cm³? [59 kg*, 50 kg*]

Zad. **192.** Žica ima masu 0·860 g, dužinu 33 cm, a napeta je silom 4·8 kg* (gusle!); kolik je broj titraja? [203 u sek]

II. Svirala s usnama. Sl. 307. prikazuje sviralu s otvorenim krajem M ili „o t v o r e n u s v i r a l u". Kroz „nogu" p duvamo uzduh u prostor i; uzduh izlazi iz svirale na „usta" ab, koja su pri dnu „c i j e v i" svirale. Ta struja uzduha izazivlje titranje uzduha u cijevi; u svirali nastanu stojni valovi, pa su na oba kraja cijevi trbusi. Kako razmak od trbuha do trbuha obuhvata pol dužine



Sl. 307.



Sl. 308.

vala, bit će između dužine vala λ i dužine l cijevi relacija $\lambda : 2 = l$; isp. sl. 308. a, gdje je umjesto svirale predočena samo cijev. Ako je brzina valova u uzduhu c, izlazi i ovdje kao kod žice, da je broj titraja za otvorenu sviralu

$$n = c : 2\,l$$

t. j. on je obrnuto razmjeran njezinoj dužini. Kod svirale vrijedi uostalom taj zakon manje točno negoli kod žice, jer trbuh titranja nije baš na krajevima cijevi. Ako se otvor na jednom ili drugom kraju ponešto smanji,

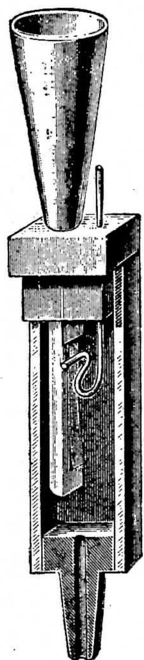
pomakne se trbuh i visina se tona promijeni; da se to pokaže, uzmu se dvije svirale jednako udešene, pa se jednoj smanji otvor; čuju se onda udari.

Na kraju *M* „zatvorene svirale" jest čvor (sl. 308. d), jer poklopac priječi gibanje uzduha. Kako je razmak od čvora do trbuha četvrtina dužine vala, izlazi za dužinu vala λ_0 zatvorene svirale relacija $\lambda_0 : 4 = l$, te je broj titraja $n_0 = c/\lambda_0 = c/4l = n/2$.

Broj je titraja zatvorene svirale polovica broja titraja otvorene svirale, t. j. ton joj je za oktavu dublji.

Ako se povisi temperatura, postaje brzina zvuka u uzduhu veća, pa formula kaže, da onda i n i n_0 postaju veći t. j. ton se povisi. Isto se dogodi, kad mjesto uzduha titra koji lakši plin na pr. rasvjetni plin ili vodene pare (u pištaljci lokomotive).

Što se do sada reklo, vrijedi za osnovni ton svirale. Kako prema njemu stoje gornji tonovi, objašnjeno je u sl. 308. b i c za otvorenu sviralu, a u sl. 308. e i f za zatvorenu. Slova $\lambda, \lambda', \lambda''$ uz te slike jesu dužine vala za tonove otvorene svirale, te je $\lambda' = \lambda : 2$, $\lambda'' = \lambda : 3$. Kako su frekvencije obrnuto razmjerne dužini vala, vidimo, da su brojevi titraja za osnovni i gornje tonove otvorene svirale redom n, $2n$, $3n$ . . (kao kod žice!).



Sl. 309.

$\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$ jesu dužine vala za tonove zatvorene svirale, te je $\lambda_1 = \lambda_0 : 3$, $\lambda_2 = \lambda_0 : 5$. Osnovni ton i gornji tonovi zatvorene svirale slijede dakle redom sa frekvencijama n, $3n$, $5n$ . .

Kod duge (duboke) i uske svirale može se ojačom strujom uzduha lako postići, da uopće ne da osnovnoga tona; u širokih su svirala gornji tonovi slabi. — Donekle kao u svirale pobuđuje se i ton flaute; u oba se primjera uz jedan kraj cijevi načini struja uzduha nalik vrpci; dok kod svirale služe tomu umjetne „usne", kod flaute treba da svirač zgodnim namještajem svojih usana takvu struju pobudi.

Zad. **193.** Neka se odredi krupno u stopama dužina otvorene svirale, koja daje ton *c* sa 64 titraja u sek; brzina je zvuka 340 m/sek, 1 m ≐ 3 stope. [8 stopa]

Zad. **194.** Brzina je zvuka u uzduhu razmjerna drugom korijenu apsolutne temperature; kod koje će temperature ton svirale biti za poluton (15 : 16) viši negoli kod 0 °C? [kod 37 °C]

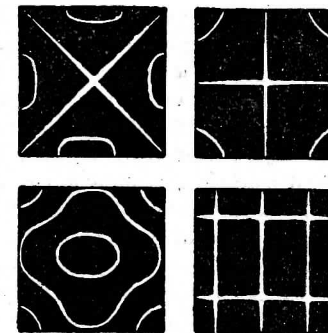
III. Svirala s jezičcem. U svirali s jezičcem (sl. 309.) prolazi uzduh kroz otvor, koji se titranjem t. zv. jezičca periodički zatvara i otvara; time nastaju zgušćenja i razređenja uzduha kao kod sirene. Trublja nalikuje takvoj svirali, premda nema jezičca; kao jezičac kod nje služe usne trubljačeve; najznatniji su ovdje visoki gornji tonovi, pa je vještina sviračeva, da umije prema potrebi izvesti jedan ili drugi gornji ton.

Velike orgulje imadu po nekoliko tisuća svirala svake vrste.

IV. Glazbena viljuška. (Shore 1711.) predočena je u sl. narednoga §; obično je od čelika. Možemo je pomišljati kao savinut štap, koji je učvršćen na dršku. Stavlja se u titranje bilo udarcem batića bilo gudalom; trajno titra elektromagnetska viljuška. Kad viljuška titra, njezini se „kraci" izmjenice zbližuju i razilaze. — Zgodnim udarcem možemo kod velike viljuške pobuditi gornje tonove. Prvi gornji ton ima frekvenciju $6^1/_4$ puta veću od frekvencije osnovnoga tona, drugi gornji ton ima frekvenciju $17^1/_2$ puta veću. Ti gornji tonovi naskoro iščeznu, pa je onda ton viljuške jednostavan. Viljuška služi mnogim akustičkim pokusima, pa i za određivanje visine tona.

V. Titranje ploča. Elastična ploča oblika kvadratičnoga, kružnoga i t. d. učvršćena je u jednoj točki i posuta pijeskom. Pritisnimo ploču prstom i stavimo gudalom u titranje, tako da se čuje određen ton. Pijesak se namjesti u „čvorne crte", koje nam kažu, gdje je ploča mirna. Tako dobiveni likovi zovu se Chladnijevi (Chladni 1787.); na jednoj jedinoj ploči može ih se načiniti vrlo mnogo (sl. 310.).

VI. Čovječji glas nastaje u grkljanu. Iz pluća dolazi kroz dušnik struja uzduha, pa ide kroz „glasnicu" ili glotis (grč. γλωττίς; Galen, 160. posl. Kr.), t. j. otvor, što se u grkljanu nalazi među dva napeta nabora, koji se zovu „glasila" ili „glasovne usne". Glasila titraju pri tome na poseban način, koji se bar u tom može isporediti s titranjem žice, što je broj titraja otprilike kao kod žice zavisan o dužini i o napetosti. U muškarca glasila imadu dužinu prosjekom 20 mm, u žene 15 mm, u djece 6 do 8 mm.

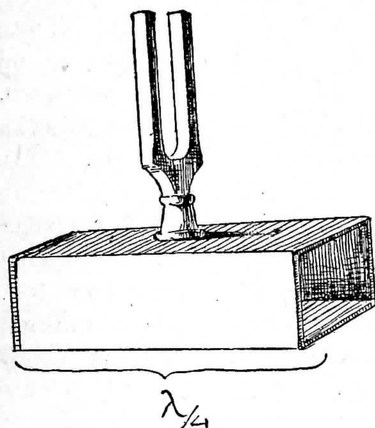


Sl. 310.

260. Različite primjene nauke o titranju i valovima. I. Udari. (Isp. § 242.). Mnoga zvona sama za se daju udare. Dolazi to otuda, što zvono u isti mah daje dva tona, kojima se visine neznatno razlikuju. Udare možemo čuti i od gornjih tonova akustičkih sprava. Na pr. dvije viljuške sa frekvencijama 128 i 129 titraja daju svake sekunde 1 udar; u isto se vrijeme može čuti $6^1/_4$ udara njihovih prvih gornjih tonova.

II. Resonancija. (Isp. § 243.) Mnoge glazbene sprave dale bi same sobom preslab ton; one se na premalo mjesta dotiču uzduha, pa ih ne možemo dobro čuti. No ako je takva sprava učvršćena na kakvom

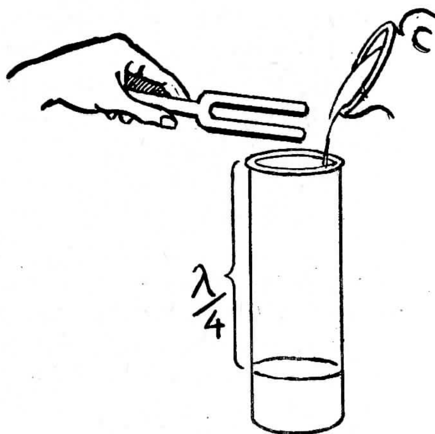
ormariću, ton se znatno pojača. Zato se žice kod glasovira, gusala i t. d. učvršćuju na „pod resonancije", koji prima gibanje od žice, pa ga širokom svojom površinom predaje uzduhu. Takav pod resonancije pojačava ojednako i visoke i duboke tonove. I viljuška se obično učvršćuje na drvenu kutiju bez jedne stijene; veličina se kutije uzme tolika, da stup uzduha u kutiji ima ton jednako visok kao i kutija (sl. 311.).



Sl. 311.

Ako viljušku, koja titra, približimo otvoru visoke čaše (sl. 312.) i u čašu nalijemo vode, kod određene ćemo visine vode čuti jak ton; to će biti onda, kada stup uzduha u čaši ima takvu visinu, da baš resonira na ton viljuške. — Osobito se jaka resonancija dobiva, kad se zvonu, koje titra, približi šupalj valjak, kojega stup uzduha ima jednaku visinu kao i zvono (Savart 1820.).

Kod pjevanja izlaze različiti samoglasnici prema tome, koji oblik daje pjevač usnenoj šupljini. Ta šupljina resonancijom pojačava izvjesne gornje tonove sadržane u tonu glasila. Donoseći pred usta glazbene viljuške pokazujemo resonancijom, koji je ton usnene šupljine (Donders 1856.). Ako pjevamo ljestvicu polutonova na jedan isti samoglasnik na pr. „o",oblik se usnene šupljine ne mijenja; ona resonira na onaj gornji ton glasila, koji je tonu usnene šupljine baš najbliži. Određenomu samoglasniku pripada kod različitih ljudi ista visina tona usnene šupljine. Na pr. kad se pjeva ili govori „o", usnena šupljina udešena je na ton, koji je za poluton viši od komornoga *a* (dakle joj je frekvencija otprilike 435·16:15). — Kad pjevamo „i", oblik je usnene šupljine takav, da može resonirati na dva različita tona (kao kod boce s dugačkim grlom); i onda se pojačavaju oni gornji tonovi, koji su blizu tima dvjema tonovima usnene šupljine. — Kad šapćemo samoglasnik, bit će da se čuje samo ton usnene šupljine; ne možemo mijenjati visine šaptanoga samoglasnika, ako ne ćemo da promijenimo i sam samoglasnik.



Sl. 312.

III. Interferencija. (Isp. § 250.) Ako preko jednoga kraka viljuške, koja titra, oprezno prevučemo valjak od ljepenke, tako da valjak ne dotakne viljuške, ton se pojača. Dok nije bilo valjka, valovi su se uzduha, što dolaze od jednoga kraka, sastavljali s valovima od drugoga kraka, pa su se oslabljivali. — Ako je držak viljuške, koja zvuči, vertikalan, pa viljušku blizu uha vrtimo oko vertikalne osi, primjećujemo, da se jakost tona mijenja. Interferencijom valova, što dolaze od oba kraka, nastaje u različitim mjestima različito jako titranje.

261. Širenje zvuka. Brzina se zvuka u uzduhu može odrediti tako, da se noću ispali top, a iz mjesta udaljenoga za nekoliko kilometara motri se bljesak topa i odredi vrijeme, koje prođe od časa, kad se vidio bljesak, do časa, kad stigne zvuk. Kako je brzina svjetlosti silno velika, može se uzeti, da se svjetlost opazila u isti čas, kad je i zasjala, pa izmjereno vrijeme znači vrijeme, što ga zvuk treba, da stigne od topa do motrioca. Izlazi kod 0 °C **331** m/sek.

Brzina je zvuka jednaka za visoke i niske tonove, za jake i slabe; izlazi to na pr. otuda, što naše uho ne čuje glazbu manje skladno iz daljine negoli iz bliza. Što je viša temperatura, to je veća brzina zvuka u uzduhu, te je na pr.

kod	—35° C brzina	309 m/sek
	0°	331
	15°	340
	100°	386.

Ako se mijenja tlak, brzina se ne mijenja gotovo ništa. Plin, koji je kod danoga tlaka rjeđi od drugoga, ima veću brzinu. Zato je u uzduhu, kojemu su primiješane vodene pare, brzina zvuka veća negoli u suhom uzduhu.

Metodom topa odredio je brzinu zvuka Mersenne (1636.). Newtonu (1685.) i Laplaceu (1816.) zahvaljujemo formulu, na osnovu koje se može brzina zvuka odrediti računom, bez osobitih mjerenja. — Brzina je zvuka u vodi otprilike 1·4 km/sek, u željezu i čeliku oko 5, u drvu 3 do 5. — Brzina se zvuka u plinu ili tekućini može odrediti uz pomoć malih množina tvari, ako proizvedemo i izmjerimo Kundtove likove. (§ 252. III.).

Zad. **195.** Zvukom frekvencije 2125 u sek nastali su u nekoj cijevi Kundtovi likovi, te je razmak 1. hrpe prašine od 11. hrpe 80·0 cm. Kolika je brzina zvuka? [340 m/sek]

Odbijanjem zvuka može nastati jeka. Treba tome stijena (kuća, pećina, šuma), kojoj su protege veće od dužine vala zvuka. Stijena treba da je dosta daleko od uha, da jeka ne stigne prebrzo, te da se ne smiješa s izvornim zvukom. Kad slušamo jeku zvuka, kojega nismo sami proizveli, primjećujemo, da vrijedi zakon odbijanja, da je kut odraza jednak kutu doraza. (§ 247.) — Grmljavina se tumači odjekivanjem u oblacima.

Dubljine se morske brzo određuju time, što se mjeri, koliko vremena treba od časa, kad se na lađi proizveo zvuk, do časa, kad se k lađi vrati jeka sa dna morskoga. (Brzina zvuka otprilike 1435 m/sek.) Uredba za proizvodnju zvuka i mikrofon za primanje odlaska zvuka nalaze se na istom boku lađe u jednakim visinama; u istoj je visini, ali na drugom boku lađe mikrofon za primanje jeke. (Zvuk, što oko lađe i kroz lađu stigne na taj drugi mikrofon, vrlo je slab.)

*

Zvuk se ne širi samo u pravcima, već ide i „oko ugla". To se opaža, jer zapreke, što se mogu zvuku postaviti, redovno nisu baš velike prema dužini vala zvuka. Takvo obilaženje zvuka zove se **o g i b**. Zanimljivi su pojavi širenja zvuka kod jakih detonacija. Dogodi se, da između mjesta, gdje se je dogodila detonacija, i skrajnjih udaljenosti, do kojih je zvuk dopr'o, ima „pojas šutnje", gdje se zvuk nije čuo.

D o p p l e r o v se pojav (§ 253.) kod zvuka može opaziti, ako stojimo uz željezničke tračnice, a kraj nas prođe lokomotiva, koja zviždi; ton se zviždaljke snizi u isti mah, kad primicanje lokomotive pređe u udaljivanje.

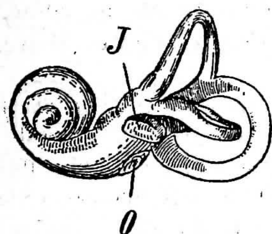
Zad. **196.** U željezničkim se kolima brzine $v = 15$ m/sek vozimo pokraj trubljača, koji stoji tik pruge; za koliko se prividno snizi ton trublje? ($c = 340$; § 253.!)

[ton se snizi u omjeru 71 : 65 t. j. gotovo za cio ton.]

262. Uho. I z v a n j e u h o. Zvuk ide kroz ušku u cijev „s l u h o v n i k". Ta je cijev na unutarnjem kraju zatvorena elastičnom opnom, koja se zove b u b n j a č a.

II. S r e d n j e u h o. Bubnjača luči izvanje uho od srednjega. I srednje je uho ispunjeno uzduhom, a vodi iz njega E u s t a c h i j e v a t r u b l j a u usta. (E u s t a c h i o 1550.). U srednjemu su uhu s l u š n e k o š t i c e; one redom spajaju bubnjaču s j a j a s t i m p r o z o r č i ć e m, t. j. elastičnom opnom, što zatvara unutarnje uho. Kroz Eustachijevu se trublju obnavlja uzduh srednjega uha i izjednačuju se tlakovi na obje strane bubnjače. (Kod jake tutnjave dobro je, da su usta otvorena.)

III. U n u t a r n j e je u h o prostorija zapletena oblika, pa se i zove l a b i r i n t (grč. λαβύρινθος, velika zgrada s mnogim zapletenim hodnicima). Njegova međa spram srednjega uha ima osim jajastoga prozorčića još jednu elastičnu opnu, o k r u g l i p r o z o r č i ć. U labirintu je tekućina, koja se zove l a b i r i n t n a v o d a; ona prenosi valove zvuka s jajastoga prozorčića k s l u š n o m ž i v c u. Ako se jajasti prozorčić poradi jaka zvuka veoma utisne u labirint, zacijelo se okrugli prozorčić pritiskom labirintne vode izobli prema srednjemu uhu.



Sl. 313.

Dok se u 3 l u k a labirintova (sl. 313., vrijedi za lijevo uho) nalazi uredba za oćut ravnoteže (F l o u r e n s 1824.), zvuk se zapaža u onom dijelu labirinta, koji se zove p u ž n i c a. Ona je slična puževoj kućici, a ima $2^1/_2$ zavoja. U tim se zavojima proteže gotovo do vrha pužnice pregrada, koja luči labirintnu vodu u dva dijela, što su samo na vrhu u savezu. Jajasti prozorčić J leži na jednoj strani te pregrade, okrugli O na drugoj. Valovi zvuka idu dakle poglavito uzduhom sluhovnika, pa se prenesu bubnjačom, slušnim košticama, jajastim prozorčićem na labirintnu vodu. U njoj se šire u pužnici duž jedne strane

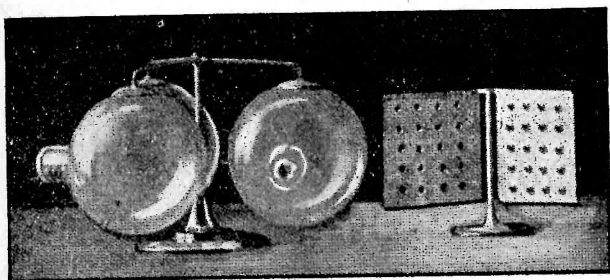
spomenute pregrade, a duž druge strane dolaze na okrugli prozorčić. Pregrada u pužnici jednim je svojim dijelom k o š t a n a, a to je dio, koji je bliži osi pužnice; elastična opna, što upotpunjuje pregradu, zove se b a z i l a r n a o p n a (novolat. *basella, mala osnovka*); misle, da je ona ponajznatniji dio slušnoga organa. Nategnuta smjerom svoje dužine ona se lako rastrgne, dok joj je čvrstoća u smjeru širine znatna. Bit će da su poprečna vlakna bazilarne opne napeta, pa ih možemo u neku ruku isporediti s napetim žicama glasovira. Dužina tih vlakana, t. j. širina bazilarne opne iznosi blizu okrugloga prozorčića 0·04 mm, pri vrhu pužnice 0·5 mm. Vlakna resoniraju i pobuđuju slušni živac, koji do bazilarne opne svojima okrajcima svagdje dopire. (H e l m h o l t z o v a resonancijska teorija slušanja 1869.). Ti se okrajci zovu C o r t i j e v o r g a n (Corti 1846.).

Kako slušamo sa dva uha, pogađamo s m j e r, otkuda zvuk dolazi, te pri tom pažljiv motrilac ne treba da griješi ni za 1°. Fizikalni je tome razlog razlika faza, kojima titra jedno i drugo uho; što veći je kut između zrake zvuka i ravnine simetrije čovječje glave, to veća će biti razlika putova, što ih zvuk treba do jednoga i do drugoga uha, pa je onda to veća i spomenuta razlika faza. — Ako na uho djeluju s t o j n i valovi zvuka, najviše se zvuk osjeća u čvoru titranja (t. j. tamo, gdje čestice miruju, a tlak se najjače mijenja).

263. Tonovi kombinacije. Ako u isti čas zvuče dva jaka tona, viši sa frekvencijom n, niži sa frekvencijom n', može se čuti još i „t o n d i f e r e n c i j e", kojemu je broj titraja $n - n'$. Na pr. ako uz ton c s brojem titraja 2088 zvuči još i slijedeći d, kojemu je frekvencija 2349, čuje se za 3 oktave dublji c sa frekvencijom $2349 - 2088 = 261$. Te je tonove otkrio T a r t i n i (Trtinić? 1714., „Tartinijevi tonovi"), a zakon za njihov broj titraja utvrdio je H ä l s t r ö m (tekar 1819.). Taj ton ne postoji izvan našega uha: mi ga i čujemo na poseban način, kao da nastaje u našoj glavi iza uha. Po H e l m h o l t z o v o j teoriji ton diferencije nastaje u uhu poradi zamršenoga titranja bubnjače. Ima i drugih, slabijih tonova, na koje ta teorija vodi, pa se svi tonovi ove ruke zovu „t o n o v i k o m b i n a c i j e" (lat. *combino, sastavljam dvoje*).

264. Sile zvuka. Valovi zvuka mogu pokrenuti tjelesa, na koja udaraju. — U oduljem staklenom ormariću, koji je na jednom kraju otvoren, visi na svilenoj niti vertikalna papirna pločica usporedno sa dužinom ormarića. Ako se izvodi zvuk, na koji uzduh ormarića resonira, pločica se namjesti o k o m i t o na smjer titranja uzduha (D v o ř á k 1875.). — Kad na šuplju kuglu, koja ima otvor, dolaze valovi zvuka, na koje uzduh kugle resonira, kugla se nastoji pomaći, kanda je tištimo na otvor. D v o ř á k o v o je a k u s t i č n o r e a k c i j s k o k o l o sastavljeno od 3 takva jednako udešena resonatora, koji su zgodno namješteni u krug oko osi sprave (sl. 314. lijevo).

Ako zvuči ton, na koji kugle resoniraju, kolo se vrti. (Isp. reakcijsko kolo opisano u § 115.). — Zvukov radiometar (Dvořák 1881). jest spravica, koja se vrti oko vertikalne osi, a ima 3 vertikalna krila od aluminija (sl. 314. desno); u svakom krilu jesu otvori, kojima su rubovi u obliku prikraćena čuna nadignuti, svi na istu stranu. Ako se taj radiometar stavi u staklen ormarić na mjesto, gdje je trbuh titranja, vrtjet će se znatnom brzinom. (Reakcijsko se kolo vrti najbrže u čvoru t. j. gdje se tlak najjače mijenja. — Isp. još radiometar § 313.).



Sl. 314.

265. Fonograf. Edison je izumio (1877.) spravu, koja može ponavljati zvukove, a zove se fonograf. Valovi zvuka udaraju na elastičnu opnu, koja nosi oštar klinčić. Ispod klinčića vrti se valjak pokriven s kakvom popustljivom masom (smjesa voska sa stearinom, prije kositer); kako opna titra, klinčić zadire sad više sad manje u tu masu i dubljina jarka, što se načini, odraz je zvuka, poradi kojega je opna titrala. Da ne bi isto mjesto valjka po drugi put došlo ispod klinčića, valjak se kod svakog okreta vrlo malo pomakne duž svoje osi, tako da onaj jarak ima oblik kao i zavoji vijka. Tako fiksiran zvuk može se kasnije ponoviti, ako pustimo, da se valjak nanovo vrti ispod opne, pa se klinčić, koji sada ne smije biti oštar, skliže u jarku, koji se prije izdubao. Klinčić dolazi u titranje nalik onome, koje je jarak izdublo; poradi toga zatitra opna, pa i uzduh.

Kod gramofona (Berliner 1887.), načini se jarak utisaka zvukovih na ravnoj ploči, u obliku spirale sve manjih zavoja; smjer titranja leži u ravnini ploče, pa se valoviti oblik jarka lupom lako opaža.

Otisci se zvuka umnažaju galvanoplastički.

Zad. **197.** Kolika je na gramofonskoj ploči dužina vala za a frekvencije 435, ako je promjer zavoja 200 mm, a kod snimanja je zvuka ploča načinila u 1 min 90 okreta? [2·16 mm]

266. Jakost i glasnoća zvuka. Zamislimo okomito na smjer širenja zvuka komadić ravne plohe veličine 1 cm². U zvuku se širi mehanička energija, pa neka prođe kroz onu plohu u 1 sek J erga energije. Onda je jakost zvuka J erg/(cm² sek). Kako se ta veličina određuje iz amplitude titranja (§ 254.), ne će se ovdje razložiti. Neka budu samo spomenuti neki

rezultati. Ton frekvencije 1000 na granici čujnosti, t. j. kada se jedva još čuje, širi se jakošću 10^{-9} erg/(cm² sek). Nadalje se našlo, da je za onakve vrsti zvuka, za koje je uho osobito osjetljivo, opseg jakosti vrlo širok, te je kod tona frekvencije 1000 najjači zvuk, koji već prelazi u bol, 10 biljuna (10^{13}) puta jači od najslabijega, koji se jedva čuje.

Takvim se velikim brojevima uklanjamo, ako jakosti zvuka ispoređujemo na slijedeći način. Ako je jakost J zvuka

$$k = 1{\cdot}259 = \sqrt[10]{10} \text{ puta veća}$$

od jakosti J' drugoga zvuka, kažemo, da je prvi zvuk jači od drugoga **za 1 decibel.**

Općenije:

ako je $J : J' = k, k^2, k^3 \ldots k^x$,
onda je prvi zvuk jači od drugoga za 1, 2, 3 ... x decibela.

Na pr. ako je zvuk na granici boli 10^{13} puta jači nego li na granici čujnosti, te su granice razmaknute za 130 decibela, kako slijedi iz jednadžbe

$$\sqrt[10]{10^x} = 10^{13}.$$

Prelaz na decibele matematički znači, da umjesto potencija („brojeva") k^x uzimljemo eksponente (logaritme) x ili — što je isto — umjesto geometrijske progresije veličinâ J uvodimo aritmetičku progresiju veličina x. Taj se prelaz opravdava time, što se prema psihofizičkom zakonu (Fechner i Weber) nama čini, da oćuti rastu u aritmetičkoj progresiji, kada podražaji rastu u geometrijskoj.

Decibel je $^1/_{10}$ jedinice „bel", koja se više ne upotrebljava, a dali su joj ime po izumiocu telefona (§ 212.).

Decibeli važni su, jer služe kao osnov za ljestvicu glasnoće. Tu treba razlikovati od jakosti zvuka. Uho je naime za razne vrsti zvuka različito osjetljivo, pa dva zvuka različite vrsti, koja se uhu čine jednako jaka, uistinu to redovno nisu. Tako na pr. da nam se dubok ton čini jednako jak kao ton srednje visine, treba da se širi s većom jakošću. Praktički je važno, da ispoređujemo zvukove prema njihovoj prividnoj jakosti, t. j. kako ih uho primjećuje. Baš tu prividnu jakost zovemo glasnoćom i mjerimo je fonima. Pri tome glasnoću kojegagod zvuka ispoređujemo sa glasnoćom tona „normalne" frekvencije 1000.

Ako nam neki zvuk izlazi toliko glasan koliko ton normalne frekvencije, kojemu je jakost f decibela iznad granice čujnosti, onda kažemo, da zvuk ima glasnoću f fona. Za kojigod zvuk, koji je upravo na granici čujnosti, glasnoća je 0 fona, a za zvukove na granici boli otprilike 130 fona, tako da ljestvica fonova obuhvata brojeve od 0 do 130. Za sam ton normalne frekvencije foni se podudaraju sa decibelima. Lako se pamti: razlika glasnoće 1 fon je nešto veća od najmanje razlike glasnoće, koja se još može

razaznati; zvukovi koji bi se u jakosti još manje razlikovali, nego što odgovara toj najmanjoj razlici glasnoće, pričinjaju nam se jednako glasni.

Primjeri: glasnoća šapta (u sobi) 10 fona, običnog razgovora 40, buke u vrlo prometnoulici 70, velikog orkestra (fortisimo) 80.

Iznesene definicije decibela i fona odobrene su od I. međunarodne akustičke konferencije držane u Parizu 1937. Zgodna sprava za ispoređivanje glasnoća je mjerač štropota (Barkhausen).

267. Ultrazvuk. U novije vrijeme ispituju se mehanički titraji i valovi, kojima su frekvencije mnogo veće negoli je frekvencija gornje granice zvuka (§ 257.). Kako s fizikalnog gledišta nema načelne razlike između tih pojava i zvuka, smatramo ih zvukom u širem smislu riječi i zovemo ultrazvuk. Da izvedemo ultrazvuk, puštamo titrati tjelesa, koja su sitna.

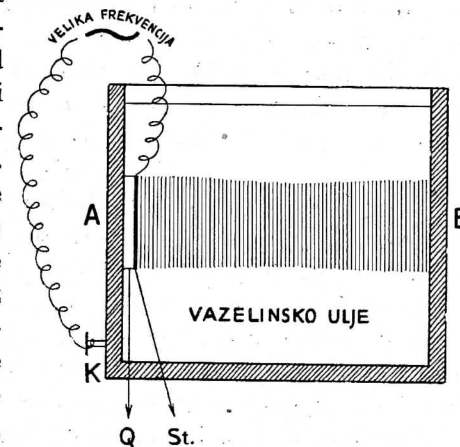
Zamislimo staklen štap dužine $l = 1$ m; ako ga učvrstimo u sredini i taremo vlažnom krpom blizu jednom kraju, štap zvuči, jer titra longitudinalnim stojnim valovima i to s 1 čvorom (u sredini) i dva trbuha (na krajevima): sredina je mirna, a krajevi se zbližuju i udaljuju. (Isp. titranje spirale u sl. 298. a i titranje zraka u sl. 308. a). Frekvencija je približno $n = c:2l$, gdje je c brzina zvuka u staklu. Ako je ta brzina 5600 m/sek, izlazi $n = 2800$ titraja u sek. Kad bi se štap skratio na polovicu, bila bi frekvencija dvostruka, a kad bi titrao štapić dužine 2 mm, izašao bi broj titraja $2800 \times 500 = 1400000$. Međutim tako kratak staklen štap ne znamo staviti u titranje.

No što ne ide kod stakla, ide sa kvarcom. Zamislimo pločicu od kvarca debljine 2 mm. Možemo je smatrati štapom dužine 2 mm i staviti u titranje, tako da joj se debljina („dužina štapa") povećaje i smanjuje. Kako je brzina longitudinalnih valova u kvarcu slične veličine kao u staklu, titrat će pločica sa kojih 1 i pol milijuna titraja. Pobuditi možemo to titranje na taj način, da se poslužimo svojstvom kvarca, da je piezoelektričan. To će reći: 1. kada pločicu zgodno izbrušenu iz kvarcova leca stisnemo, javljaju se na jednoj osnovci pločice slobodni pozitivni elektricitet, na drugoj negativni; i 2. stavimo li pločicu u električno polje okomito na pločicu, ona se stisne ili nadme, prema tome koji je smjer polja. Ako dakle pločicu stavimo u izmjenično električno polje, ploča će nastojati da mijenja debljinu onom frekvencijom, kojom polje titra. To će titranje biti uopće neznatno, ali ako udesimo, da električno polje ima onoliku frekvenciju, kakva je frekvencija slobodnoga titranja pločice, nastat će resonancijom titranje pločice velike jakosti.

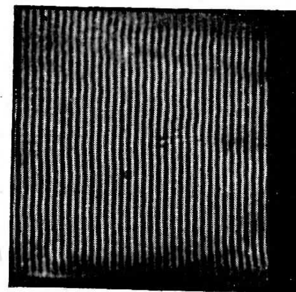
Sl. 315. prikazuje jedan pokus. U pravokutnoj kiveti od mjedi nalazila se bistra tekućina, vazelinsko ulje. Prednja i stražnja stijena kivete bile su od stakla; kod A nalazila se u kiveti prilijepljena na stijenu od mjedi okrugla kvarcova pločica Q debela 2 mm (promjer 20 mm) i na pločicu nalijepljen list od staniola $St.$ Električne oscilacije izvode se uz pomoć

elektronske cijevi (§ 223.) i dovode kvarcu sa dvije žice, kojih jedna svršava na kiveti, druga na staniolnom listu. Frekvencija pločice bila je 1450000.

Titranje kvarca prenosi se na ulje i u njemu valovima putuje k suprotnoj stijeni; na njoj se valovi (kod B) odbiju i putuju natrag, te valovi jednog i drugog smjera interferencijom stvaraju u tekućini stojne valove. Pri tome su čvorovi i trbusi ravnine usporedne s pločicom. Fotografija[1]) (sl. 316.), koja prikazuje te stojne valove, dobivena je tako, da se kroz kivetu puštao naprosto svežanj usporednih zraka svjetlosti (iz udaljene svjetle točke; Dvořákova metoda!) na fotografsku ploču. U čas, kada su elongacije titranja najveće, u čvornim je ravninama gustoća tekućine izmjenice najveća i najmanja, pa kako gušća mjesta tekućine drukčije lome svjetlost nego li rjeđa, razlike se gustoća očituju razlikama rasvjete na fotografskoj ploči: svjetle crte u snimci odgovaraju čvornim ravninama. Izmjerivanjem se našlo, da je razmak susjednih čvorova iznosio približno ½ mm, pa kako je kod same pločice razmak trbuha 2 mm (debljina pločice), a frekvencija kvarca ista koja i frekvencija tekućine, izlazi, da je brzina valova u kvarcu $2 : \frac{1}{2} = 4$ puta veća nego li u vazelinskom ulju.



Sl. 315.


Sl. 316.

Ultrazvučni valovi u tekućinama izvode zanimljive učinke: uzburkavaju površinu, povisuju temperaturu, izazivlju kemijske pretvorbe, a i znatne fiziološke pojave (uništavaju sitne organizme, a i životinje). Takvom tekućinom mogu se izvoditi slični pojavi ogiba svjetlosti i spektri, kako se dobivaju optičkom mrežicom (§ 303.).

Piezoelektricitet otkrili su braća J. i P. Curie 1880.; ime mu je prema grč. πιέζω, stiskavam.

[1] Snimio: Pejnović.

3. Geometrijska optika

268. Širenje svjetlosti u pravcu. Ona grana fizike, koja ispituje pojave, što ih pravilnom primjenom oka opažamo kao svjetlost, zove se nauk o svjetlosti ili optika (grč. ὀπτικά). Svjetlost, koju zatvoreno oko vidi poradi pritiska, ne zasijeca u optiku. — Ponajpače se znatnošću svojom odlikuju pojavi svjetlosti, što ih izražavaju

zakon pravocrtnoga širenja,
zakon odbijanja i
zakon loma svjetlosti;

ti zakoni služe još i za osnov tumačenja velikoga broja drugih pojava optičkih, koji se svi iz njih gometrijskim putem izvode. Dio optike posvećen tim pojavima zove se geometrijska optika.

U sredstvu, koje je posvuda u svakom pogledu jednako, svjetlost se rasprostire „u pravcima". Ako u tamnu sobu pustimo trak sunčane svjetlosti, vidimo stup rasvjetljene prašine, koji nas podsjeća na pravac; ako je trak svjetlosti tako uzak, da se na njegovu širinu i ne obaziremo, zove se zraka svjetlosti. Zrake su svjetlosti pravci.

To se svojstvo svjetlosti mnogostruko primjenjuje. Njim se besvijesno služimo, kad po vidnim oćutima određujemo razmještaj tjelesa, što nas okružuju. Mnogi se pravci i ne daju drukčije odrediti negoli uz pomoć zrake svjetlosti (na pr. u geodeziji i astronomiji). Pravocrtnim se rasprostiranjem svjetlosti tumači sjena predmeta.

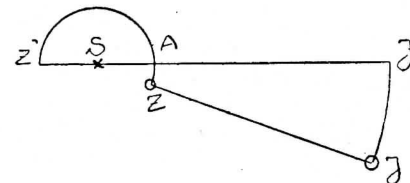
Pravocrtno se širenje svjetlosti primjenjuje kod tamne izbe (lat. *camera obscura*; Levi ben Gerson 1321.). Ako u tamnu sobu ulazi svjetlost samo kroz malen otvor (na pr. sa širinom 1 cm), nastaje na suprotnoj strani obrnuta slika izvanjih predmeta. Ta slika doduše nema oštrine, jer od svake svjetle točke ide kroz otvor čun svjetlosti, koji načini na stijeni svjetlu mrlju, pa se susjedne mrlje od česti preklapaju. Svejedno je, kakav je oblik otvora (krug, trokut i t. d.). — Svjetle elipse ili krugovi, što se vide na tlu šume za sunčana dana, slike su Sunca, koje nastaju prolaženjem zraka sunčanih među rupicama u lišću. Ako Sunce poradi pomrčine ima igled srpa, onda su i te slike srpovi (Aristotel).

Zad. **198.** Kroz uzak otvor ulazi svjetlost sunčana u sobu i načini na papiru udaljenom 6·96 m eliptičku sliku Sunca, kojoj je najmanji promjer 6·1 cm; kolik je prividni promjer Sunca? [$^1/_2$ °]

Zad. **199.** Pun Mjesec motrimo kroz cijev, koja se dade rastezati, a unutarnji joj je promjer 1 cm; koliku treba uzeti dužinu cijevi, da vidimo baš cijeli Mjesec, kad je prividna veličina promjera mjesečeva *a*) 33′, *b*) 30′? [*a*) 104 cm, *b*) 115 cm]

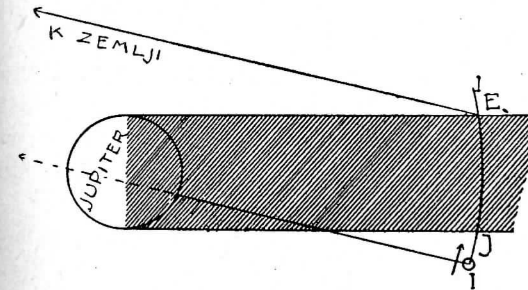
269. Brzina svjetlosti. Prije nego što se odredila brzina svjetlosti, neki mišljahu, da je ta brzina beskrajna, te da svjetlost ne treba vremena za širenje. Prvi je odredio brzinu svjetlosti Römer (1675.), kojega su navele na to okriće osobitosti u slijedu pomrčina Jupiterovih mjeseca.

Jupiterov t. zv. I. mjesec tako je blizu Jupiteru, da kod svakoga ophoda ulazi u sjenu svoga planeta i pomrča. Sa Zemlje se može motriti, kako taj mjesec iščezne u sjeni ili opet nanovo zasja, kad iz sjene izađe. Prvi se pojav zove imerzija, drugi emerzija (lat. *immergo, uronim*; *emmergo, izronim*). Neka je ZZ' (sl. 317.) put, što ga Zemlja prevali od časa, kad je Jupiter J nasuprot Suncu S, do časa, kad se Jupiter J' prividno sa Suncem sastane. Na tom putu možemo motriti samo emerzije, jer nam je pojav imerzije zastrt samim Jupiterom. (Isp. sl. 318., gdje je predočen Jupiter sa svojom sjenom i komad puta mjesečeva I I s točkom imerzije I i točkom emerzije E.)



Sl. 317.

U drugu ruku dok se Zemlja Jupiteru približuje, možemo motriti samo imerzije. Römer je našao, da su mjerena razdoblja između dvije susjedne emerzije osjekom veća negoli razmaci među imerzijama, a objasnio je to time, što se Zemlja, dok motrimo emerzije, od Jupitera udaljuje, pa svjetlost Jupiterova mjeseca kod kojegod emerzije treba više vremena da stigne do Zemlje negoli kod pređašnje emerzije.



Sl. 318.

Svoje je mišljenje Römer potkrijepio još i ovako. Dok je Zemlja blizu točke Z, Zemlja se i Jupiter giblju okomito na spojnicu ZJ, pa se njihov razmak gotovo ništa ne mijenja od jedne emerzije do druge (I. mjesec treba otprilike $42^1/_2$ sata za 1 ophod), te svjetlost od obiju emerzija treba jednako vrijeme do Zemlje. Mjereni razmak od emerzije do emerzije bit će dakle pravo vrijeme ophoda. Znajući vrijeme ophoda možemo izračunati časove slijedećih emerzija, pa motrenja pokazuju, da slijedeće emerzije na oko sve više zakašnjavaju za tim izračunanim časovima. Kad se najposlije Jupiter sastane sa Suncem, emerzije su već zaostale prividno za 1000 sek (onda je Jupiter za nas iščeznuo u sjaju sunčanom, pa se to vrijeme zakašnjavanja računa iz emerzija, koje su se mogle još vidjeti). Put je svjetlosti $J'Z'$ sada za promjer AZ' zemaljske staze veći od puta svjetlosti JZ. Svjetlost treba dakle 1000 sek, da prevali dužinu promjera zemaljske staze t. j. $AZ' = 300\,000\,000$ km. Prema tome je brzina svjetlosti u Svemiru

$c = 300\,000\,000 : 1000 = 300\,000$ km/sek $= 3 \cdot 10^{10}$ cm/sek. Da se istakne, koliko je točan taj broj, možemo ga bilježiti jasnije

$$c = 3{\cdot}00 \times 10^{10} \text{ cm/sek.}$$

Römerov su rezultat općenito prihvatili, tek kad je Bradley otkrio t. zv. aberaciju svjetlosti zvijezda i s time novim načinom odredio brzinu svemirske svjetlosti, a u skladu s Römerovim rezultatom.

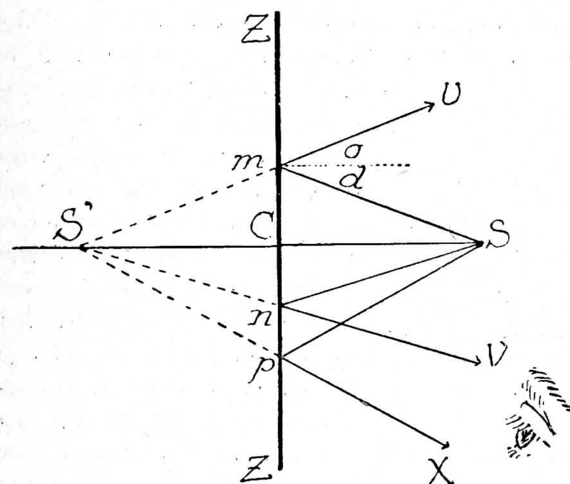
Za sada najtočnija vrijednost brzine svjetlosti u praznom prostoru izlazi (1935.) iz opsežnih mjerenja, koja su izveli Michelson i njegovi suradnici:

$$c = 299774 \text{ km/sek (nesigurnost rezultata} \pm 11 \text{ km/sek).}$$

Posljednja od tih mjerenja izvedena su sa svjetlošću, koja se širila evakuiranom čeličnom cijevi, kojoj je dužina iznosila 1 britansku milju (1609 m).

Fizeau je prvi odredio brzinu svjetlosti u uzduhu (1849.), Foucault brzinu u vodi (1854.).

270. Odbijanje svjetlosti; ravno zrcalo. Zraka se svjetlosti na dosta ravnoj površini (površina mirne vode, žive, brušenoga stakla, zrcala) odbija po zakonu, koji je od davnine poznat: 1. kut odraza jednak je kutu doraza, 2. upadajuća i odbijena zraka određuju „ravninu refleksije", koja je okomita na ravnini površine. Isp. zakon odbijanja u § 35. i 247.



Sl. 319.

Ako svežanj zraka padne na komad papira, svjetlost će se odbijati na sve strane; ta se vrst refleksije zove difuzna.

Na osnovu zakona refleksije može se tumačiti djelovanje zrcala. ZZ neka znači ravno zrcalo (sl. 319.), S svjetlu točku ispred zrcala, SC okomicu spuštenu iz točke S na zrcalo, C njezino nožište. Iz točke S idu zrake svjetlosti na sve strane. Nacrtajmo kojugod zraku Sm i refleksijom dobivenu zraku mU; ($\sphericalangle o = \sphericalangle d$). Ako zraku mU u misli produžimo iza zrcala, sjeći će okomicu u točki S'. Budući da je $\Delta S'mC \cong \Delta SmC$ (zašto?), bit će

$$S'C = SC.$$

To vrijedi bez obzira na to, u kojoj je točki zraka zgodila zrcalo, pa će odbijene zrake nV, pX . . . također presijecati okomicu u točki S'. Sve dakle zrake poslije refleksije idu tako kao da su došle iz točke S'. Za oko je učinak zraka takav kao da je u S' svjetla točka (dijete se ispred zrcala isprva vara, pa misli da je u S' doista svjetla točka).

Svjetlu točku, što je vidimo u S', zovemo slikom točke S. Slika S' i predmet S stoje simetrično s obzirom na ravninu zrcala. — Svežanj zraka, što idu kroz jednu istu točku, zove se homocentričan svežanj (grč. ὁμός, *zajednički*); razabiramo, da ravno zrcalo od homocentričnoga svežnja zraka refleksijom načini opet homocentričan svežanj.

Ako je svjetao predmet sastavljen od mnogo svjetlih točaka, izlazi opet slika simetrična s predmetom (dakle i jednako velika).

Ravno se zrcalo mnogo primjenjuje. Kad hoćemo praviti pokuse sa sunčanom svjetlošću, navraćamo svjetlost s pomoću zrcala u zgodan smjer (heliostat). Heliotrop (Gauss 1820.) služi geodeziji za davanje znakova na oveće daljine (ća i preko 200 km). kod njega zrcalo na jednoj postaji odbija sunčanu svjetlost prema drugoj postaji (ἥλιος, *sunce*; τρέπω, *okrećem*). — Iza kazaljke kojegod mjeraće sprave može se staviti ravno zrcalo, pa kod čitanja ljestvice treba paziti, da kazaljka pokrije svoju sliku; time se uklanjamo kosomu gledanju („paralaksi"). — Ako dva zrcala stavimo jedno prema drugome, slika, što nastane u jednom zrcalu, vrijedi kao svjetli predmet za drugo, pa nastaje od slike slika, a onda od te slike u prvom zrcalu opet slika i t. d.; ako su zrcala međusobno priklonjena, sve se slike svjetle točke poređaju u krug, kojemu je središte na pravcu, u kojemu se zrcala sijeku. (Kaleidoskop, Brewster 1817.).

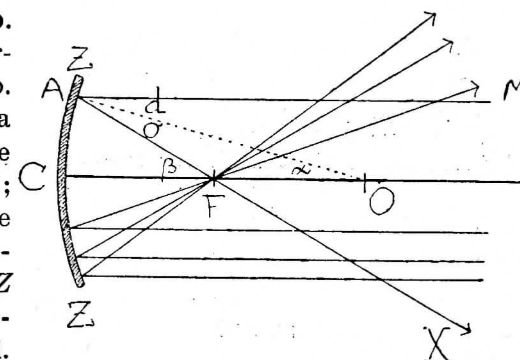
Zad. **200.** Koliko visoko treba da je vertikalno zrcalo, da čovjek visok 170 cm sebe cijela vidi u zrcalu?

Zad. **201.** Okruglim zrcalom treba navratiti sunčanu svjetlost na točku, koja je od zrcala udaljena za 25 m, i to tako, da se iz točke vidi cijela sunčana ploča. Kolik treba uzeti promjer zrcala, ako je ono priklonjeno prema zraci odbijenoj u središtu za 20°? (prividni promjer Sunca $1/2$°!)

Zad. **202.** Predmet se postavi pred dva vertikalna zrcala, koja čine pravi kut; kad gledamo u zajednički brid zrcala, vidimo lice obrnuto smjerom lijevo-desno; zašto?

Zad. **203.** Nadovezujući na pređašnji zadatak objasnite djelovanje „trostrukog zrcala"; u njemu tri zrcala čine trostran ugao, kojemu su svi kutovi pravi. Gledajući (jednim okom!) u vrh ugla vidimo lice sasvim obrnuto.

271. Sferno ugnuto zrcalo. Ako je površina zrcala dio površine kugle, zove se zrcalo sferno. Ako je površina zrcala ugnuta prema zrakama svjetlosti, zove se zrcalo ugnuto ili konkavno; ako je površina pupčasta, zove se zrcalo pupčasto ili konveksno. Sferno je zrcalo ZZ obično pravilno omeđeno, pa možemo jednu njegovu točku C (sl. 320.) zvati sredinom; središte kugle, kojoj zrcalo pripada, zove se središte zrcala O. Pravac CO jest *os* zrcala, dužina CO polumjer zrcala.



Sl. 320.

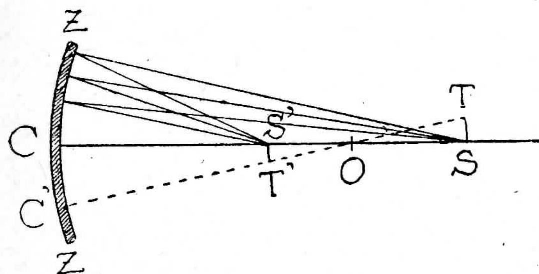
Da odredimo, kako se odbije zraka *MA*, koja zgađa konkavno zrcalo u točki *A*, treba nacrtati kut doraza *d*, t. j. kut zrake *MA* i okomice *OA* (polumjera); zatim se nacrta kut odraza $o = d$, pa se dobije odbijena zraka *AX*. Ako je zraka *MA* usporedna osi, bit će ∢ *AOC* ili $\alpha = d$. Odbijena zraka *AX* presijeca os u točki *F*, pa je njezin priklon spram osi ∢ *AFC* ili $\beta = 2\alpha$. Luk *AC* pričinja se dakle iz točke *F* 2 puta veći negoli iz točke *O*. Ako je još taj luk malen i α i β maleno, izlazi, da je razmak *CF* ili *f* približno $^1/_2$ razmaka *CO* ili *r*:

$$f = \frac{r}{2}.$$

Ako zraka dolazi usporedno osi, a nije znatno udaljena od osi, presijecat će poslije refleksije os u točki *F*, koja približno raspolavlja razmak sredine od središta. Drugim riječima: uzak se svežanj zraka usporednih osi iza refleksije sastaje u jednoj točki; ta se točka zove žarište ili fokus (lat. *focus*), a njezin razmak od zrcala žarišna daljina. Zrake, što dolaze od Sunca, mogu u žarištu upaliti komadić papira.

Put se zrake svjetlosti može okrenuti, pa razabiremo, da su zrake, što izlaze iz žarišta, poslije refleksije usporedne s osi. Na osnovu toga svojstva može se ugnutim zrcalom svjetlost lučne lampe u uskom svežnju slati na mnogo km udaljenosti. „Svjetlomet".

Za zrake, što dolaze usporedno s osi, može se pomišljati da im je izvor silno udaljena svjetla točka na osi. One su homocentrične, pa vidimo, da od toga homocentričnoga svežnja iza refleksije nastane opet homocentričan svežanj. Ako ni jedna zraka ne čini s osi velik kut, vrijedi to — kako geometrija pokazuje — i općeno, t. j. zrcalo sastavlja zrake, što dolaze od svjetle točke, refleksijom opet u jednoj točki; potonja je točka slika prve.

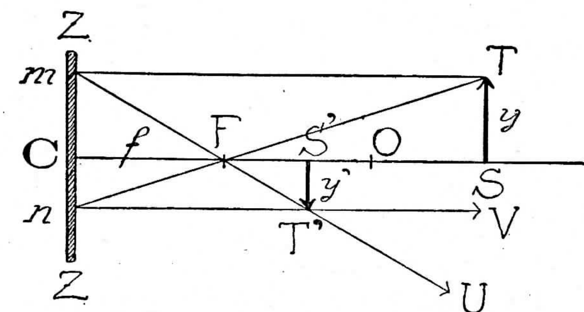


Sl. 321.

Zraka, što prije refleksije ide kroz središte *O*, dolazi na zrcalo okomito, pa se okomito i odbije, te ide obrnutim smjerom u svoj pređašnji pravac. Kako je ona prije refleksije išla kroz svjetlu točku, a poslije refleksije ide kroz sliku, razabiramo, da pravac, što spaja točku s njezinom slikom, ide kroz središte.

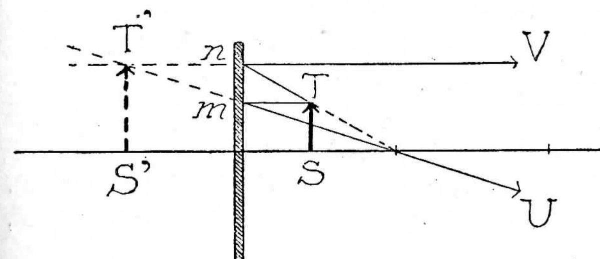
Ako je *S'* slika točke *S* (sl. 321.), a svjetla je točka *T* udaljena od središta *O* koliko i točka *S*, bit će i slika *T'* točke *T* od *O* udaljena koliko i *S'*. Kratki luk *ST* može se uzeti kao komadić pravca okomit na os,

pa isto vrijedi i za *S'T'*. Odatle izlazi: ako je svjetli predmet rasprostrt u ravnini okomitoj na osi, bit će i slika njegova u ravnini okomitoj na osi; ona će biti i geometrijski slična predmetu, jer spojnica svake točke i njezine slike ide kroz središte.



Sl. 322.

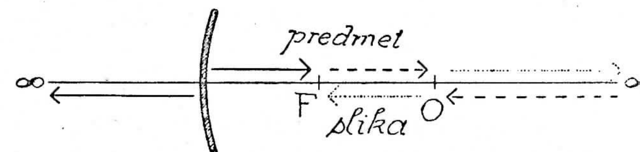
Sliku svjetle točke *T*, koja je izvan osi zrcala *ZZ*, naći ćemo ovom konstrukcijom (sl. 322.). Zraka *Tm* usporedna s osi odbija se kroz žarište pravcem *mU*; zraka *Tn*, što ide kroz žarište, odbija se usporedno s osi pravcem *nV*. Kroz sjecište *T'* zraka *mU* i *nV* idu i sve ostale odbijene zrake, pa je *T'* slika točke *T*. Ako se iz točke *T* i *T'* spuste na os okomice *TS* i *T'S'*, bit će prema pređašnjemu *T' S'* slika predmeta *TS*.



Sl. 323.

U crtnji prikazano je sferno zrcalo kao da je ravno. Pomišljamo, da je središte *O* zrcala daleko i da je crtnja izvedena u mjerilu, koje je u smjeru osi prikraćeno.

U gornjoj je crtnji predmet *TS* dalje od zrcala negoli središte *O*; slika je između žarišta i središta, pa je možemo uhvatiti na malen zastor, dakle je „realna" ;ona je obrnuta i manja od predmeta ili „umanjena". Kad bi u istoj crtnji *S'T'* značilo svjetao predmet, bila bi njegova slika *ST*.



Sl. 324.

Ako je predmet između žarišta i središta, slika je dalje nego središte, ona je obrnuta i povećana.

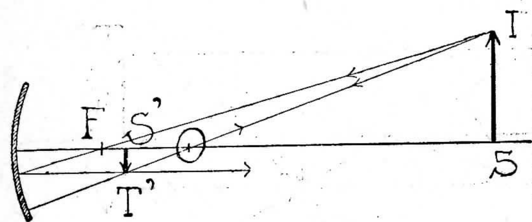
Ako je predmet između zrcala i žarišta, zrake se *TmU* i *TnV* poslije refleksije ne sijeku (sl. 323.). Produlje li se iza zrcala, daju sjecište *T'*. To

je primjer kao kod ravnoga zrcala; slika se ne da uhvatiti na zastor, ona je „imaginarna“; ona je uspravna i povećana. (Lat. *imaginarius, prividan*).

U sl. 324. pregledno je naznačen položaj slike za kojigod položaj predmeta. Kad se predmet pomiče putom, što ga pokazuje gornja strelica, jednako označena donja strelica pokazuje put slike:

kad je predmet tik zrcala, i slika je tik zrcala;

kad predmet prođe kroz žarište, slika preskoči iz silne daljine iza zrcala u silnu daljinu ispred zrcala;



Sl. 325.

kad je predmet u središtu, slika je u središtu;
kad je predmet beskrajno daleko, slika je u žarištu.

Gdjekada je zgodno crtati zraku, što ide kroz središte O. Kako se onda konstruira slika T' točke T, prikazano je sl. 325.

272. Formula za sferno zrcalo. Veličina slike i mjesto njezino mogu se i računom odrediti. Iz sl. 322. izlazi

$$\Delta\, CnF \sim \Delta\, STF \qquad \text{dakle } Cn : ST = CF : FS$$
$$\Delta\, S'T'F \sim \Delta\, CmF \qquad \text{„} \quad S'T' : Cm = FS' : CF.$$

Ako se označi udaljenost predmeta od zrcala $CS = a$ (poznato),
veličina predmeta $ST = Cm = y$ (poznato),
udaljenost slike od zrcala $CS' = b$ (nepoznato),
veličina slike $S'T' = Cn = y'$ (nepoznato),

mogu se gornji razmjeri bilježiti

$$\frac{y'}{y} = \frac{f}{a-f}, \qquad \frac{y'}{y} = \frac{b-f}{f}.$$

Iz prve od tih jednadžbi može se izračunati veličina slike y'. Ako se izjednače desne strane obiju jednadžbi, dobiva se

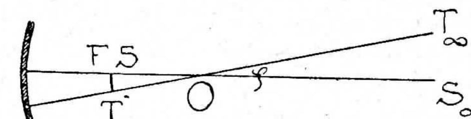
$$f/(a-f) = (b-f)/f$$
$$f^2 = ab - bf - af + f^2$$
$$bf + af = ab \qquad : abf$$
$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}.$$

Iz te se jednadžbe izračunava udaljenost slike b.

Na pr. ako je predmet vrlo daleko, bit će $a = \infty$, $0 + 1/b = 1/f$, $b = f$;
ako je predmet u središtu, bit će $a = 2f$, $1/b = 1/f - 1/2f = 1/2f$, $b = 2f = a$, $y' = f/(2f - f) \cdot y = y$;
ako je predmet tako blizu zrcalu, da je $a < f$, bit će $1/b = 1/f - 1/a =$ $=$ *negativno*, dakle $b =$ *negativno*; šuteći se uzelo, da je u crtnji razmak CS pozitivan, a slika je bila ispred zrcala; kako sada izlazi taj razmak negativan, slika je iza zrcala; u tom primjeru dobiva se i $y' =$ *negativno*. Budući da se u crtnji uzela veličina slike pozitivna, a slika je bila obrnuta, značit će negativno y' uspravnu sliku;

ako je predmet tik zrcala, $a \doteq 0$, bit će $b \doteq 0$, $y' \doteq -y$.

Da su te formule valjane, može se pokazati na **optičkoj klupi**. To je duga vodoravna motka, razdijeljena na cm; na njoj se može po volji namjestiti zrcalo, svjetao predmet i malen bijel zastor za hvatanje slike. Zastor se dotle pomiče, dok ne bude na njemu oštra slika.



Sl. 326.

Ako je predmet vrlo velik i veoma udaljen (na pr. Sunce), treba staviti $y = \infty$ i $a = \infty$. Onda formula daje za $y' = f/(\infty - f) \cdot \infty = \infty/\infty$, što nije određeno. Ako je prividna veličina predmeta φ (sl. 326.), bit će

$$y' = FT' = FO \cdot tg\varphi = f \cdot tg\varphi.$$

Što je veća žarišna daljina zrcala, to je veća slika beskrajno udaljenoga predmeta. Kut φ treba da je malen; ako kut mjerimo radijanima, izlazi dakle za veličinu slike beskrajno udaljenog predmeta:

$$y' = f \cdot \varphi.$$

Ako se sferno zrcalo samo vrlo malo razlikuje od ravnoga, a predmet je blizu zrcalu, stavit ćemo $f = \infty$. Formule onda daju

$$\frac{y'}{y} = \frac{1}{\frac{a}{f} - 1} = \frac{1}{0 - 1} = -1, \quad y' = -y$$

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{\infty} = 0, \quad \frac{1}{b} = -\frac{1}{a}, \quad b = -a,$$

a to su rezultati, što vrijede za ravno zrcalo.

Zad. **204.** Dokažite, da vrijedi relacija $y' : y = b : a$.

Zad. **205.** Nađite 1. konstrukcijom, 2. računom veličinu i položaj slike, ako je predmet toliko udaljen od zrcala koliko od žarišta. [$y' = -2y$, $b = -f$]

Zad. **206.** Na optičkoj se klupi izmjerilo, da zrcalo načini od predmeta udaljena 130·0 cm sliku udaljenu 111·5 cm; kolika je žarišna daljina zrcala? kolik polumjer? [60·0 cm, 120·0 cm]

Zad. **207.** Kolik je promjer slike sunčane, što je načini zrcalo reflektora (vrst dalekozora), ako je polumjer zrcala 15·2 m, a prividna veličina sunčanoga promjera $1/2^0$? [6·6 cm]

Zad. **208.** Galvanometar sa zrcalom ima konkavno zrcalce sa $f = 45$ cm; kamo treba staviti izvor svjetlosti, da zrcalo načini sliku udaljenu 1 m? [0·82 m daleko od zrcala]

Zad. 209. Ispred konkavnog zrcala sa žarišnom daljinom 30 cm namješten je u daljini 20 cm okomito na os zrcala štapić dugačak 1 cm; koliko je velika slika štapića? Kolika je slika, ako štapić zaokrenemo u os, te su mu krajevi od zrcala udaljeni za $19^1/_2$ i $20^1/_2$ cm? [3 cm; 9 cm]

Zad. 210. Neki čovjek može oštro vidjeti u daljinu veću od 20 cm, a ne na bliže; u kojem razmaku treba da drži konkavno zrcalo žarišne daljine 30 cm, da oštro vidi svoje oko *a*) uspravno, *b*) obrnuto? [*a*) bar 8·4 cm, *b*) bar 71·6 cm]

Zad. 211. Od plamena svijeće treba načiniti s pomoću sfernoga zrcala realnu sliku u horizontalnom razmaku 1 m; koliko treba da je f i kamo treba zrcalo namjestiti, da slika bude 2 puta veća od plamena? [$f = {}^2/_3$ m, $a = 1$ m]

273. Sferno pupčasto zrcalo. Uzak svežanj zraka, što dolaze usporedno s osi na konveksno zrcalo, iza refleksije se razilazi i to tako kao da zrake idu iz j e d n e točke, „žarišta", koja je iza zrcala. I sada vrijedi, da je žarišna daljina polovica polumjera (zašto?). Za ovo zrcalo vrijede formule predašnjega §, ako se stavi f = *negativno*. Ako je na pr. polumjer pupčastoga zrcala 20 cm, bit će $f = -10$ cm,

$$\frac{y'}{y} = \frac{-10}{a+10}, \quad \frac{1}{a} + \frac{1}{b} = -\frac{1}{10}.$$

Odatle se vidi, da je u svima primjerima y' = *negativno*, apsolutna vrijednost $y' < y$ i b = *negativno*; slika je dakle vazda uspravna, smanjena i iza zrcala.

Uvođenjem negativnih veličina nauka je o zrcalima (i lećama) postala jednostavnijom, jer je time j e d n a formula obuhvatila s v e slučajeve. (H a l l e y 1693.).

Osim ravnih i sfernih zrcala još se upotrebljavaju p a r a b o l i č n a, h i p e r b o l i č n a i e l i p t i č n a. Dobiju se, ako površinu zrcala načinimo prema geometrijskoj plohi, koja nastaje kad se vrti parabola ili hiperbola ili elipsa oko (glavne) osi; pri tome se uzimlje dio plohe, koji je oko vrha krivulje. — Kod paraboličnog se zrcala zrake usporedne s osi poslije refleksije presijecaju t o č n o u žarištu, što je već Grcima bilo poznato. Takva zrcala trebaju kod velikih dalekozora reflektora. Zrake, što iz geometrijskog žarišta padnu na hiperbolično ili pak eliptično zrcalo, sastaju se poslije refleksije u drugom geometrijskom žarištu; treba dakle od tih geometrijskih žarišta razlikovati optičko žarište, u kojem se sastaju zrake, koje su prije refleksije bile usporedne s osi.

Zad. 212. Geometrijska žarišta hiperboličnog zrcala leže jedno 3 m iza zrcala, drugo 10 m ispred zrcala; gdje je optičko žarište? [4·3 m iza zrcala]

Zad. 213. Staklo paraboličnog zrcala dalekozora-reflektora na M o u n t W i l s o n u u Kaliforniji (dalekozor dovršen 1909.) na stražnjoj je strani ravno, te mu je sredina debela 17·5, a rub 19·4 cm; širina je zrcala 152 cm („60 palaca"); kolika je žarišna daljina f? (Naputak: neka se primijeni jednadžba parabole $y^2 = 4fx$). [f = 7·6 m]

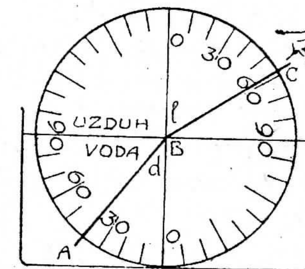
274. Lom svjetlosti. Štap, kojega je dio uronjen u vodu, čini nam se na površini vode prelomljen; dolazi to otuda, što se zrake svjetlosti na prelazu iz jednoga sredstva u drugo lome. Zakon loma glasi:

1. lomljena i upadna zraka određuju ravninu, koja je na graničnoj ravnini okomita; 2. omjer je sinusa kuta loma i sinusa kuta doraza

kod svakoga priklona upadne zrake jednak ili — uz oznake § 249. (sl. 327.) —

$$\frac{\sin d}{\sin l} = \textit{konstantno}.$$

Taj je zakon prvi izrekao (u drugom obliku) S n e l l (1618.). Ispitati se može taj zakon na pr. onakvima mjerenjima, kakva je izvodio P t o l e m e j (2. vijek poslije Kr.). Pred krugom razdijeljenim u stupnjeve mogu se vrtjeti oko središta kruga dva ravnala AB i BC; krug se u vertikalnom namještaju uroni u vodu do središta svoga. Donje se ravnalo, AB, namjesti u kojigod priklon, a gornje se ravnalo dotle zakreće, doklegod gledajući duž CB ne vidimo BA kao produženje od CB, te nam se čini, da je CBA jedan pravac. Onda se izmjere kutovi d i l i izračuna omjer njihovih sinusa. Isto se ponovi kraj kojeggod drugog priklona ravnala AB.



Sl. 327.

Kad svjetlost ide iz vode u uzduh, približno je $\sin d : \sin l = 3 : 4$; kad ide iz stakla u uzduh, $\sin d : \sin l = 2 : 3$.

Ako je kut doraza malen, bit će i kut loma malen; budući da je onda $\sin d \doteq d$ radijana, $\sin l \doteq l$ radijana, glasi kod malenih kutova zakon loma $d : l$ = *konstantno*.

Zad. 214. Neka se u tablici prikaže, koji kutovi loma pripadaju kutovima doraza 10°, 20°, 30°, 40°, kad svjetlost ide iz stakla u uzduh.

[10°	15° 6']
:	:

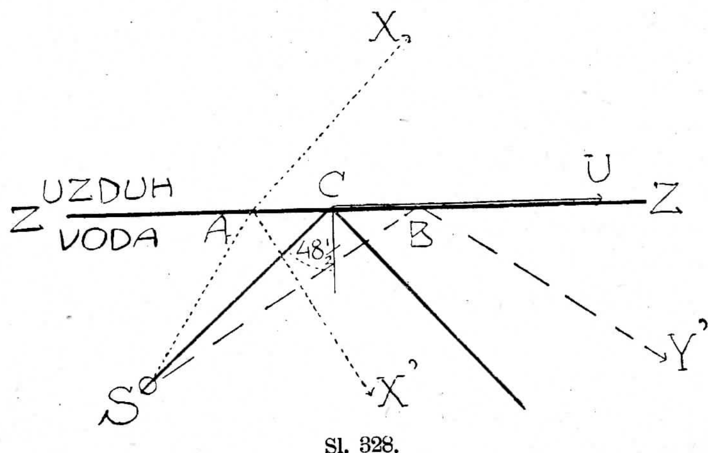
275. Teorija loma. Počevši od kraja 17. vijeka pobijale su se dvije teorije svjetlosti: N e w t o n o v a teorija svjetlosnih čestica i H u y g e n s o v a teorija valova. Prva je učila, da tijelo, koje svjetli, izašilje ili emitira sitna tjelešca, koja silnim brzinama lete kroz prozirna tjelesa, a ulazeći u oko izvode osjet svjetlosti; to je t e o r i j a e m i s i j e ili k o r p u s k u l a r n a t e o r i j a (lat. *corpusculum, tjelešce*). Huygensova teorija, koja veli, da je svjetlost pojav valova, zove se u n d u l a t o r n a teorija (lat. *undulatus, valovan*). Po Newtonovoj se teoriji svjetlosne čestice odbijaju od granice dvaju sredstava onako, kako se elastična kugla odbija od elastične stijene (§ 35.), po Huygensovoj onako, kako se odbijaju valovi (§ 247.).

I Snellov zakon izlazi iz Huygensove teorije (§ 249.), pa se teorijom još i upotpunjuje, jer teorija kaže, da je konstanta Snellova zakona jednaka o m j e r u b r z i n a s v j e t l o s t i; budući da je za prelaz iz vode u uzduh konstanta = 3 : 4, bit će brzina u vodi = $^3/_4$ brzine u uzduhu.

Kad svjetlost ide iz sredstva, u kojemu se sporije širi („optički gušće" sredstvo), u sredstvo, u kojemu se širi brže („optički rjeđe" sredstvo), lomi se od o k o m i c e, jer gdje je veća brzina, tamo je i veći kut zrake i okomice.

Baš obratno izlazi iz Newtonove teorije, te bi po njoj brzina svjetlosti bila u vodi veća negoli u uzduhu. Kada mjerenja pokazaše, da to nije (§ 269.), ostaviše teoriju emisije i posljednji njezini pristaše.

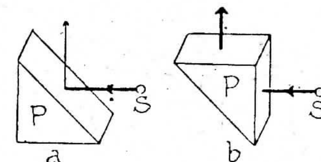
Svjetlost se širi i kroz prostore među nebeskim tjelesima; kako u tima prostorima zacijelo nema gotovo ništa o b i č n e tvari, uzimlje undulatorna teorija, da postoji osobita tvar t. zv. e t e r („svjetlosni eter"), sredstvo, koje se posvuda nalazi i u kojemu se valovi svjetlosti šire. (Grč. *αἰθήρ, gornji sloj uzduha.*)



Sl. 328.

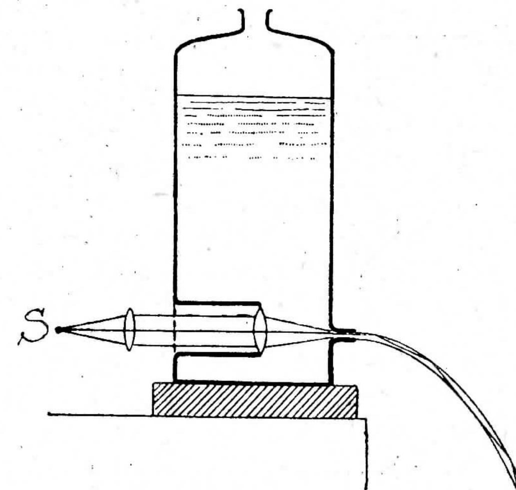
276. Totalna refleksija. Kada zraka svjetlosti SC (sl. 328.) ide iz vode u uzduh, može se odabrati kut doraza tako velik, da je kut loma $= 90^0$, pa lomljena zraka CU tiče površinu. Onda je $\sin l = 1$, dakle je $\sin d : \sin l = \sin d : 1 = 3 : 4$, t. j. $d = 48\frac{1}{2}^0$. Taj se kut doraza zove g r a n i č n i k u t. Bude li d veće od graničnog kuta, bit će $\sin d > \frac{3}{4}$, dakle $\sin l = \frac{4}{3} \sin d > \frac{4}{3} \cdot \frac{3}{4}$, $\sin l > 1$. No sinus ne može biti veći od 1, pa zakon loma sada više ne vrijedi. Iskustvo pokazuje, da sada i nema lomljene zrake. U sl. 328. prikazane su zraka SA, koja se lomi (AX) i odbija (AX'), i zraka SB, koja se samo odbija (BY'). Energija se svjetlosti porazdijeli među odbijenu i lomljenu zraku. Kad nema lomljene zrake, s v a energija prijeđe u odbijenu zraku, koja je onda istoga sjaja kao i zraka prije refleksije. Refleksija se zato zove „p o t p u n a" ili „t o t a l n a". (Lat. *totus*, *sav.*) Totalna refleksija može nastati samo, kad svjetlost udara na granicu iz gušćega sredstva.

Totalnu refleksiju primjenjujemo u optičkim spravama, da zraku svjetlosti skrenemo u drugi smjer, a da se ipak ne izgubi ništa svjetlosti. Na prizmi P (isp. slijedeći §) neka se odbije zraka svjetlosti jedamput, kako je predočeno u sl. 329. a), drugi put prema crtnji b); u potonjem je primjeru reflektirana svjetlost mnogo jača (premda se nešto svjetlosti izgubi tamo, gdje svjetlost uđe u staklo i gdje izađe). — Ako se u mlaz vode pusti svjetlost iz lučne lampe S u smjeru mlaza (sl. 330.), svjetlost ne će iz mlaza izaći, jer će se na stijenama mlaza totalno reflektirati i u slomljenim crtama slijediti zavoje mlaza. Ako je u vodi nešto smrvljene krede, mlaz će se prikazati sav sjajan („C o l l a d o n o v o vrelo", 1842.; bojadisani vodoskok na Pariskoj izložbi 1900.)



Sl. 329.

277. Izvodi iz zakona loma. 1. Put, kojim zraka ide prelazeći iz vode u uzduh, može zraka opisati i obrnutim smjerom. Neka je kut doraza u vodi d, kut loma (u uzduhu) l, a kod obrnutog puta kut doraza (u uzduhu) l, kut loma (u vodi) x. Budući da su sinusi razmjerni brzinama, bit će



Sl. 330.

$$\sin d : \sin l = 3 : 4, \quad \sin l : \sin x = 4 : 3$$

dakle je $x = d$.

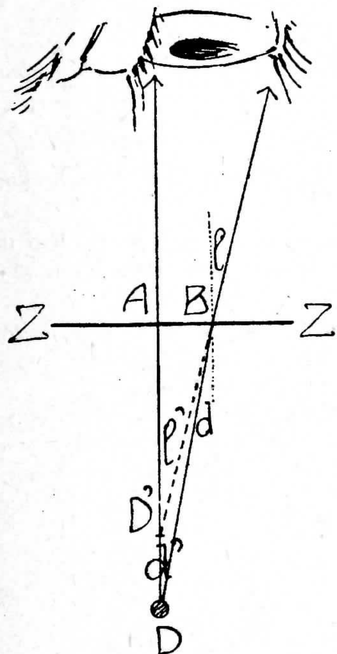
2. Ako s mosta gledamo vertikalnim smjerom dno vode, čini nam se dno za $\frac{1}{4}$ dubljine uzdignuto. Neka je ZZ površina vode (sl. 331.), D svjetla točka dna. Vertikalna zraka svjetlosti DA ne će se lomiti, dok se zraka DB s m a l e n i m kutom doraza lomi od okomice prema formuli $d : l = 3 : 4$. Lomljena zraka presijeca vertikalnu zraku u točki D', pa je približno $AD' : AD = d : l = 3 : 4$. Odatle slijedi $DD' = \frac{1}{4} AD$. U istoj točki D' presijecaju i druge obližnje lomljene zrake vertikalu, pa je ta točka slika točke D. — Još viša nam se pričinja točka u vodi, kad je koso motrimo.

Zad. **215.** Na slova knjige položimo staklenu ploču debelu 3 cm; koliko nam se čini debela ploča, kad kroz nju čitamo?

Zad. **216.** Ako šiljkom igle dotaknemo obično zrcalo, čini nam se, da je slika šiljka od šiljka udaljena za 3 mm; kolika je debljina stakla? [$2\frac{1}{4}$ mm]

*

3. Planparalelna zove se ploča, ako je omeđena sa dvije usporedne ravnine. Ako svjetlost određenim smjerom udara iz uzduha u planparalelnu staklenu ploču, izlazi na drugoj strani usporedno svojem prvobitnom smjeru. (Zašto?)



Sl. 331.

Zad. **217.** Na staklenu ploču debelu 2 cm dolazi zraka svjetlosti pod kutom doraza 80°; za koliko se zraka prošavši kroz ploču pomakla? [za 1·67 cm]

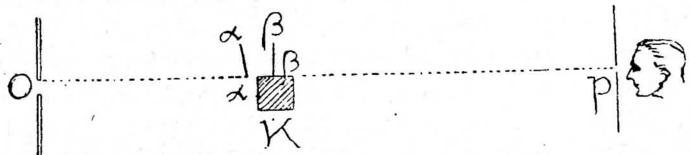
4. U „praznom" je prostoru brzina svjetlosti veća nego u ikojoj običnoj tvari. Omjer brzine svjetlosti u praznom prostoru prema brzini u kojemgod tijelu zove se indeks loma toga tijela (lat. *index, oznaka*). Indeks je loma za uzduh samo 1·0003, za vodu $^4/_3$, za staklo $^3/_2$. Prema tome je brzina svjetlosti u uzduhu gotovo tolika kao i u praznom prostoru.

Neka je brzina svjetlosti u praznom prostoru c, u vodi v_1. u staklu v_2. Onda je indeks loma za vodu $c : v_1 = n_1$, za staklo $c : v_2 = n_2$. Odatle dobiva se dijeljenjem $v_2 : v_1 = n_1 : n_2$. No $v_2 : v_1$ je konstanta zakona loma za prelaz iz stakla u vodu. Ta se konstanta može dakle izračunati, ako znamo indeks loma vode i indeks loma stakla.

Zad. **218.** Indeks je loma za dijamant 2·42, za glicerin 1·47; kako glasi zakon loma za prelaz iz glicerina u dijamant? kolike su brzine svjetlosti u tima tjelesima? [$\sin d : \sin l = 1{\cdot}65$; 124000 km/sek, 204000 km/sek]

Zad. **219.** Kolik je granični kut u staklu s indeksom loma 1·5, kolik u dijamantu s indeksom 2·4? [42°, 25°]

5. Poradi loma svjetlosti u atmosferi vidimo Sunce, dok je ono još ispod horizonta. Savijanje zrake u atmosferi dade se u malom oponašati ovim pokusom (Dvořák 1908.). U drvenom je prozoru malen okrugao otvor o (promjer otprilike 1 cm), koji gledamo horizontalnim smjerom kroz malen otvor p (sl. 332.); podmetnimo drvenu kladicu k samo



Sl. 332.

toliko visoko, da svjetli otvor oku baš iščezne. Ako onda nalijemo na drvo nekoliko kapi etera (kemijske tvari, koja slučajno ima isto ime kao i hipo-

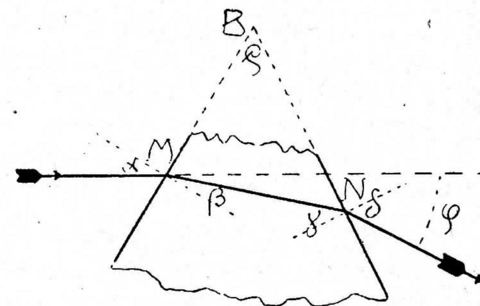
tetički svjetlosni eter), otvor se opet vidi. Poradi nejednake brzine svjetlosti u različitim slojevima eterovih para donji dijelovi vala svjetlosti zaostaju za gornjima, pa se valova ploha zakreće (iz položaja αα u ββ), a s time se kreće i zraka svjetlosti. Hladniji su slojevi para gušći, pa je u njima brzina svjetlosti manja. — Ako su donji slojevi atmosfere za mnogo hladniji dakle i gušći negoli gornji ili opet ako su za mnogo topliji, mogu se zrake svjetlosti, što dolaze od zemaljskih predmeta, u uzduhu tako savijati, da udaljene predmete vidimo ili vrlo visoko ili nisko, pa i okrenuto (fata morgana i t. d.).

6. Treperenje se zvijezda tumači time, što svjetlost njihova ide kroz atmosferu, gdje se miješaju dijelovi uzduha nejednakih temperatura. Kako je indeks loma uzduha zavisan o gustoći, a gustoća o temperaturi, zraka se svjetlosti nepravilno skreće sad amo sad tamo od pravčastoga puta. — Ako štap pružimo prema zvijezdi stajačici i s oba oka fiksiramo njegov kraj, tako da zvijezdu vidimo dvostruko, zvijezda će za svako oko drukčije treperiti.

7. Ako u cedrovo ulje stavimo obično staklo, ne ćemo stakla vidjeti, jer se svjetlost na granici stakla i ulja ne lomi, pa ni ne odbija. — U prah smrvljeno staklo izgleđe neprozirno, jer se u njem svjetlost mnogo puta lomi i odbija i poradi toga difuzno rastepe.

Zad **220.** U vodi leži vodoravna staklena ploča, pa zraka svjetlosti ide iz uzduha u vodu, a onda u staklo; pokažite, da je kut loma u staklu tolik kao da nema vode.

278. Lom u prizmi. Uzmimo staklenu prizmu, kojoj su dvije pobočke jasno brušene. Kroz jednu pobočku ulazi svjetlost iz uzduha u staklo, kroz drugu izlazi u uzduh. Pravac B (sl. 333.), u kojemu se sijeku pomenute pobočke, zove se brid prizme, priklon tih pobočaka je kut prizme ρ. Razmatrat ćemo samo takve zrake, koje idu smjerom okomitim na brid; svaka takva zraka ostaje u ravnini okomitoj na brid t. j. u „glavnom prorezu prizme".



Sl. 333.

Znatna je zadaća, da se odredi, kolik kut čini zraka, kad je izašla iz prizme, sa svojim prvobitnim smjerom; taj se kut zove otklon zrake ili devijacija (lat. *devio, skrećem s puta*). Ako je kod ulaza u prizmu (točka *M*) kut doraza α, a kut loma β, otklon je kod ulaza α — β; kod izlaza (točka N) neka je kut doraza γ, kut loma δ, dakle otklon kod izlaza δ — γ. Ukupna je onda devijacija

$$\varphi = (\alpha - \beta) + (\delta - \gamma) = \alpha + \delta - (\beta + \gamma).$$

Zbroj je kutova trokuta MNB $(90^0 - \beta) + (90^0 - \gamma) + \rho = 180^0$, te je

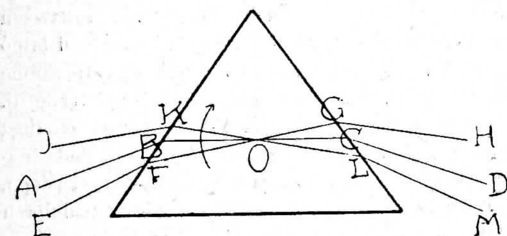
$$\beta + \gamma = \rho, \; \varphi = \alpha + \delta - \rho.$$

Ako zraka gotovo okomito pada na prizmu, a kut je prizme malen, svi su kutovi ρ, α, β, γ, δ maleni. Onda je po zakonu loma za malene kutove $\alpha : \beta = n$, $\delta : \gamma = n$, pa je otklon

$$\varphi = \beta n + \gamma n - \rho = (\beta + \gamma)n - \rho = n\rho - \rho = (n - 1)\rho.$$

Uz spomenuti je dakle uvjet otklon svih zraka jednak. Taj se poučak primjenjuje kod leće.

Ako je kut doraza kod prvoga loma jednak kutu loma kod drugoga loma, t. j. $\alpha = \delta$, zraka prolazi kroz prizmu putom, koji je simetričan. U tom je slučaju otklon najmanji (minimum devijacije, Newton). Odaberimo u prizmi točku O (sl. 334.), koja je jednako udaljena od obje pobočke, i nacrtajmo kroz tu točku zraku $ABCD$, koja prolazi simetrično, i zraku $EFGH$, koja je nešto priklonjena. Najposlije nacrtajmo slomljenu crtu $IKLM$ simetrično prema $EFGH$. Otklon je zrake $IKLM$ tolik, kolik bi bio otklon zrake obrnutoga smjera $MLKI$, dakle tolik kolik je otklon zrake $EFGH$. Prema tome su otkloni zraka $EFGH$ i $IKLM$ ili oba veća ili oba manja od otklona zrake $ABCD$. Vrti li se zraka oko točke O smjerom strelice, bit će njezin otklon u namještaju $ABCD$ ili najveći ili najmanji; simetričnoj dakle zraci pripada skrajnja vrijednost otklona. Višom se matematikom, a i pokusom pokazuje, da ta skrajnja vrijednost nije maksimum već minimum.



Sl. 334.

Zad. **221.** Granični je kut totalne refleksije za prelaz iz stakla u uzduh 42°; koju vrijednost ne smije premašiti kut prizme, da uopće može zraka svjetlosti proći kroz prizmu? [84°]

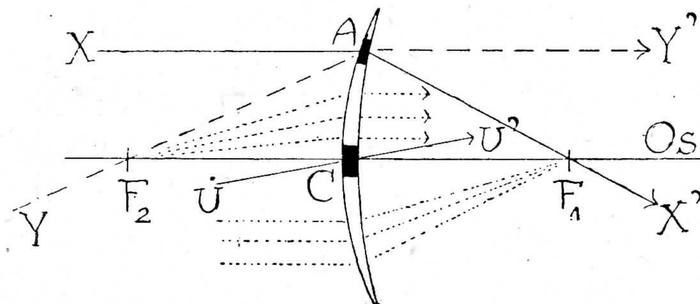
Zad. **222.** Oko motri sliku svoju, koja iza loma na prednjoj pobočki prizme nastaje odbijanjem na stražnjoj pobočki; kut je prizme 10°, indeks loma $^3/_2$; kakav je put zrake svjetlosti? (Primjer kod koso brušenih rubova zrcala.) [kutovi doraza 15°6′, 0°]

Zad. **223.** Staklena prizma malenog kuta ρ stavi se u vodu; kolik je otklon zrake, koja ulazi okomito, ako je indeks loma stakla $^3/_2$, vode $^4/_3$? [$^1/_8$ ρ]

279. Lom u leći. Optička je leća komad stakla ili druge prozirne tvari omeđen dvjema sfernim plohama i simetričan s obzirom na središnjicu kugala, kojima one sferne plohe pripadaju; središnjica kugala zove se os leće. Zraka prolazeći kroz leću lomi se dva puta, na jednoj sfernoj plohi i na drugoj. Svaka zraka, što ide duž osi, prođe kroz leću nelomljena (zašto?).

Pobliže ćemo ispitati samo tanku leću i zrake, koje su neznatno priklonjene prema osi. Mjesto C (sl. 335.), gdje os zgađa tanku leću, zove se sredina leće. Ako na leću pada homocentričan svežanj zraka, a zrake

čine i prije i poslije loma malene kutove s osi, izaći će iz leće i opet malne homocentričan svežanj. To bi se moglo računom utvrditi, ali slijedi i iz pokusa, koji uče, da leća u takvim primjerima načini oštre slike predmeta.



Sl. 335.

Zrake XAX' i YAY', koje zgađaju leću u istoj točki A, a nisu skrštene spram osi, izađu iz leće s jednakim otklonima, tako da je $\sphericalangle XAX' = \sphericalangle YAY'$. Slijedi to odatle, što se komadić leće oko točke A može smatrati kao prizma malenoga kuta, a za nju smo takav poučak dokazali u pređašnjem §.

Zamislimo zraku svjetlosti XA, koja ide kroz točku A leće, a usporedna je s osi prije loma, i zraku AY' koja također ide kroz A, a usporedna je s osi poslije loma. Kako je $\sphericalangle XAX' = \sphericalangle YAY'$, zraka će AX' poslije loma toliko se prikloniti prema osi, koliko je zraka YA priklonjena prije loma. Te zrake sijeku dakle os u točkama F_1 i F_2, koje su jednako udaljene od leće i svaka na drugoj strani leće:

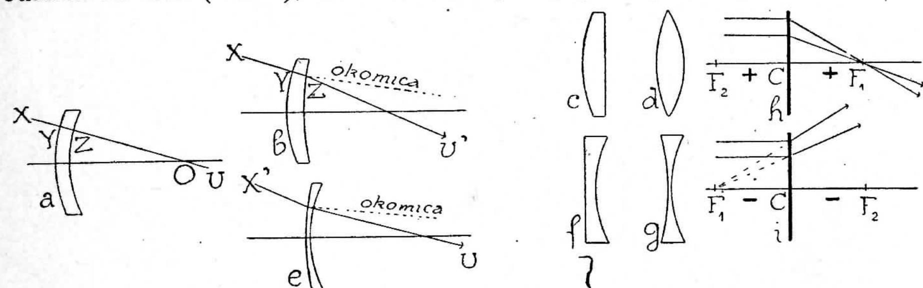
$$F_2C = CF_1.$$

Točke F_1 i F_2 zovu se žarišta. Zraka XA usporedna s osi i zraka, što ide duž osi, poslije loma se sijeku u žarištu F_1; kako homocentričan svežanj ostaje homocentričan, ići će i sve druge zrake, koje su prije loma usporedne s osi, poslije loma kroz žarište. Žarište F_2 je središte svežnja zraka, što s druge strane dolaze na leću usporedno s osi. Ako u misli okrenemo put zraka svjetlosti, razabiramo, da svežanj zraka, kojemu je prije loma središte u žarištu, poslije loma ide usporedno s osi.

Leća je oko svoje sredine C kao kakva tanka planparalelna ploča, dakle zraka UCU', što ide kroz sredinu leće, izlazi iz leće nelomljena.

Tanke leće dijelimo u dvije skupine: sabirače i rastresače. Na prelazu je leća, kojoj plohe imadu zajedničko središte (sl. 336., leća a), pa je polumjer ugnute plohe približno jednak polumjeru pupčaste. Zraka XYZ uperena prema središtu O izlazi iz leće nelomljena (zašto?), pa to isto onda vrijedi za svaku zraku. Ta leća prema tome djeluje kao planparalelna ploča.

Njezina je debljina svagdje jednaka. (Takvu leću čini staklo sfernoga zrcala.) — Ako ugnutu plohu leće mijenjamo, tako da se središte njezino sve više odmiče od leće (leća *b*), ode u beskrajnost (leća *c*) i najposlije pređe na



Sl. 336.

drugu stranu leće (leća *d*), zraka će se *XYZ* kod *Z* lomiti (od okomice) u smjer *ZU*, tako da se otklanja prema osi. Dobivene se leće zovu sabirače, te je leća *b* konkavkonveksna, leća *c* plankonveksna, leća *d* bikonveksna (lat. *bis*, *dvaput*). — Ako se središte pupčaste plohe leće *a* odmiče od leće, padne u beskrajnost i najposlije pređe na drugu stranu, zraka se otklanja od osi, kako je prikazano u crtnji leće *e*. Te su leće rastresače, napose se zove leća *e* konvekskonkavna, leća *f* plankonkavna, leća *g* bikonkavna. Dok su sabirače u sredini deblje negoli na rubu, rastresače su u sredini tanje.

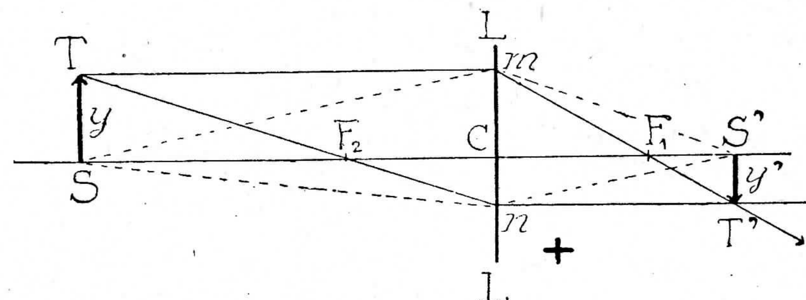
Zrake svjetlosti, što padnu na leću usporedno s osi, skupljaju se kod sabirača u žarištu F_1 na stražnjoj strani leće (sl. 336., leća *h*); kod rastresača se razilaze, kao da su došle iz žarišta F_1 na prednjoj strani (leća *i*). Žarišnu daljinu $f = CF_1 = F_2C$ leće sabirače označujemo pozitivnim predznakom, žarišnu daljinu rastresače negativnim.

Zad. **224.** Leća imade u uzduhu (u praznom prostoru) žarišnu daljinu +10 cm; kolika joj je žarišna daljina u vodi? (Isp. zad. 223.). [40 cm]

280. Slike dobivene lećom. Ako je predmet rasprostrt u ravnini okomitoj na osi, bit će i slika njegova u ravnini okomitoj na osi, a bit će geometrijski slična predmetu.

Neka je *T* svjetla točka, *T'* njezina slika dobivena lećom *LL* (sl. 337.); dvije zrake svežnja, što izlazi iz *T*, neka se lome u točkama *m* i *n* leće. Neka je *S* svjetla točka, koja je od leće toliko udaljena kao i *T*, *S'* njezina slika. Ako konstruiramo zrake *Sm* i *Sn*, bit će približno $\sphericalangle mSn = \sphericalangle mTn$, jer su *S* i *T* od leće jednako udaljeni. Povrh toga je $\sphericalangle SmS' = \sphericalangle TmT'$, $\sphericalangle SnS' = \sphericalangle TnT'$, jer leća djeluje kao prizma. U četverokutima *SmS'n* i *TmT'n* tri su dakle kuta redom jednaka, pa mora da je i $\sphericalangle mS'n = \sphericalangle mT'n$. Odatle izlazi, da su slike *S'* i *T'* jednako udaljene od leće, pa je time i gornji poučak dokazan.

Sabirače. Sliku *T'* svjetle točke *T* (izvan osi) naći ćemo crtajući dvije zrake, što iz te točke izlaze; jedna — *Tm* — neka je usporedna s osi, ona se lomi kroz žarište F_1; druga *Tn* neka ide kroz žarište F_2, ona se lomi,



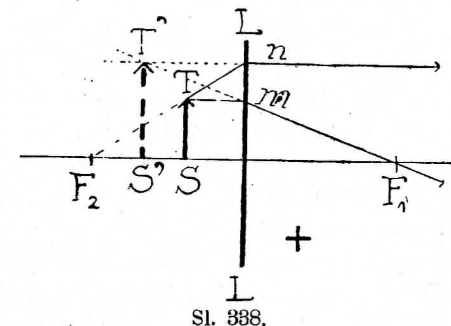
Sl. 337.

te postane uporedna s osi. Presjecište je lomljenih zraka tražena slika *T'*. Ako je *S* nožište okomice spuštene iz točke *T* na os, bit će *S'*, nožište okomice spuštene iz *T'* na os, slika točke *S*. Neka je kao kod sfernoga zrcala veličina predmeta *y*, veličina slike *y'*, udaljenost predmeta od zrcala $CS = a$, udaljenost slike od zrcala $CS = b$, žarišna daljina $CF_1 = F_2C = f$. Ako se dio crtnje, što je nalijevo od *LL*, prebaci oko *LL*, tako da padne na desni dio crtnje, točka se F_2 poklapa sa točkom F_1, pa izađe lik, koji se podudara sa crtnjom kod sfernoga zrcala (§§ 271., 272). Vrijede dakle ovdje iste jednadžbe kao i tamo, te je

$$\frac{y'}{y} = \frac{f}{a-f}, \qquad \frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}.$$

Ako izađe *y'* negativno, slika je uspravna; negativno *b* znači, da je slika na istoj strani gdje i predmet, dakle je imaginarna.

U sl. 337. bio je predočen primjer, gdje je slika realna, obrnuta i umanjena. Po jednakom je propisu izvedena crtnja 338., gdje se dobiva slika imaginarna, uspravna i povećana. — Ako je $a = 2f$, t. j. ako je predmet od leće udaljen 2 puta toliko koliko žarište, onda je $b = 2f = a$, $y' = y$ (pokaži to crtnjom); slika su i predmet jednako udaljeni od leće, slika je velika kao i predmet. — Ako se predmet onda približuje leći, slika se odmiče i postaje sve veća. — Kad predmet dođe do žarišta, slika izmakne u beskrajnost i postane bes-



Sl. 338.

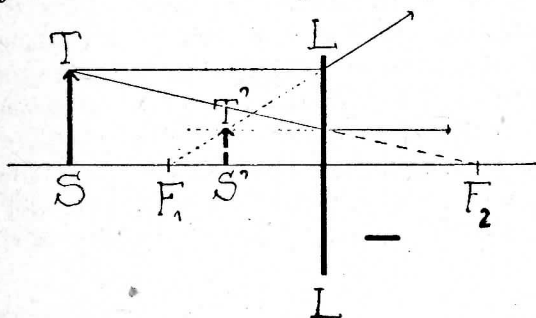
krajno velika. — Kada predmet približujući se leći prođe kroz žarište, slika preskoči u beskrajnjoj daljini na prednju strane leće i postaje imaginarna. — Kad je predmet sasvim blizu leći, imaginarna se slika također sasvim približila i smanjila gotovo do veličine predmeta.

Ako je vrlo velik predmet u vrlo velikoj udaljenosti, pa mu je prividna veličina φ radijana, dobiva se slično kao kod konkavnoga zrcala (§ 272.) $y' = f \cdot \varphi$. Slika je u žarišnoj ravnini, ravnini, koja je okomita na osi, a ide kroz žarište. Ako na zastor uhvatimo oštru sliku Sunca, zastor je od leće udaljen za veličinu f. Određivanje žarišne daljine.

Rastresače. Ako rastresača ima žarišnu daljinu na pr. —40 cm, vrijede formule

$$\frac{y'}{y} = \frac{-40}{a+40}, \quad \frac{1}{a} + \frac{1}{b} = -\frac{1}{40}, \text{ dakle } b = -a\frac{40}{40+a};$$

y' i b sada su vazda negativni, t. j. slika je uspravna i imaginarna; formule kazuju još i to, da je slika manja od predmeta i bliže leći negoli predmet. — Slika se konstruira kako je predočeno u sl. 339.



Sl. 339.

Zad. **225.** Leća sabirača načini od predmeta udaljena 130·0 cm oštru sliku na zastoru udaljenu 111·5 cm; kolika je žarišna daljina? [60·0 cm]

Zad. **226.** Predmet je udaljen od zastora 2 m; gdje treba između predmeta i zastora staviti leću sabiraču sa žarišnom daljinom $f = 15$ cm, da na zastoru izađe oštra, povećana slika predmeta? [$a = 16{\cdot}3$ cm]

Zad. **227.** Leća sabirača načini od Sunca sliku s promjerom 3·5 cm.; kolika je žarišna daljina leće, ako je prividni promjer Sunca $\frac{1}{2}^0$? [4·01 m]

Zad. **228.** Kolik je razmak slike od leće sabirače sa žarišnom daljinom 30 cm, ako je predmet udaljen 10 m, 100 m, 1000 m? [30·93 cm, 30·09 cm, 30·009 cm]

Zad. **229.** Načinom, koji je upotrebljen u sl. 324., prikažite pregledno, kako se mijenja namještaj slike, kad predmet pomičemo ispred pozitivne leće.

281. Jakost leće.

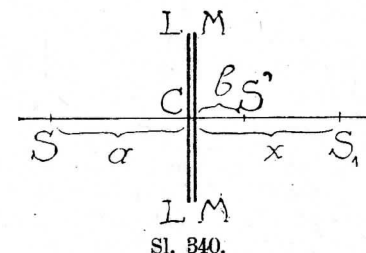
U pređašnjim se §§ šuteći uzelo, da zrake, prije negoli udare na leću (zrcalo), dolaze iz jedne točke ili divergiraju. Može se desiti, da zrake konvergiraju, t. j. one bi se sastale u jednoj točki, kad im ne bi leća bila na putu. U tom slučaju kažemo, da je predmet imaginaran, a udaljenost predmeta od leće a = *negativno*. Takvi primjeri dolaze kod optičkih sprava sastavljenih iz više leća.

Pri sastavljanju leća često dobro služi pojam jakost leće. Kad zraka u izvjesnom razmaku usporedna s osi udari na leću žarišne daljine 10 cm,

jače se lomi, nego kad udari na leću žarišne daljine 20 cm. Kažemo, da prva leća ima veću jakost negoli druga. Matematički se određuje jakost leće j kao recipročna vrijednost žarišne daljine f, te je

$$j = \frac{1}{f}, \text{ a formula za leću } \frac{1}{a} + \frac{1}{b} = j.$$

Ako se žarišna daljina mjeri na metre, jedinica je jakosti 1 dioptrija. Ako je žarišna daljina 1 m, 3 m, 0·4 m i t. d., jakost je 1 dioptrija, $\frac{1}{3}$ dioptrije, 2·5 dioptrije i t. d. Kako je kod rastresača žarišna daljina negativna, bit će i njihova jakost negativna.



Sl. 340.

Dvije tanke leće LL i MM s jakostima 3 i 2 dioptrije stave se jedna tik druge, te čine tanku dvostruku leću (Sl. 340.) Gdje je slika predmeta S, koji je od te dvostruke leće na lijevoj strani u daljini a m? Svjetlost udara najprije na leću LL, koja bi sama za se načinila sliku u točki S_1. Ta je slika predmet za leću MM, pa leća MM od „predmeta" S_1 načini sliku S' u udaljenosti b m. Udaljenost slike S_1 od leće LL treba uzeti pozitivno, ako je S_1 nadesno leći; udaljenost „predmeta" S_1 od leće MM treba uzeti negativno, ako je taj predmet nadesno leći. Ako tu udaljenost zovemo x, moramo dakle x unijeti u formule leća s obrnutim predznacima. Prema tome vrijede redom za jednu i drugu leću formule

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{x} = 3, \quad \frac{1}{-x} + \frac{1}{b} = 2.$$

Odatle slijedi zbrojidbom:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = 3 + 2 = 5,$$

t. j. dvostruka leća sastavljena od dvije tanke leće djeluje kao jedna leća, kojoj je jakost jednaka zbroju jakosti pojedinih leća. — Leća od +4 dioptrije sastavljena s lećom od —4 dioptrije djeluju kao leća od (+4) + (—4) = 0 dioptrije t. j. kao planparalelna ploča. Ako imamo zbirku rastresača poznatih jakosti, možemo za kojugod sabiraču približno odrediti jakost, ako potražimo onu rastresaču, koja s ispitivanom sabiračom zajedno djeluje poput planparalelnoga stakla.

Zad. **230.** Leća žarišne daljine 40 cm složi se s lećom žarišne daljine —20 cm; kolika je jakost dvostruke leće? [—2·5 dioptrije]

Zad. **231.** Pred ravnim zrcalom stoji 5 cm daleko leća jakosti +1 dioptrija, a 80 cm ispred leće svjetiljka. Svjetlost ide kroz leću na zrcalo, tamo se odbija i prođe nanovo kroz leću. Gdje nastaje slika svjetiljke? [132·3 cm ispred leće]

Zad. **232.** Tanka leća jakosti $+\frac{1}{3}$ dioptrije na jednoj je plohi i to konveksnoj posrebrena, tako da djeluje kao konkavno zrcalo. Polumjer je krivosti posrebrene plohe 60 cm. Kolik je polumjer konkavnog zrcala, koje bi moglo leću nadomjestiti? (Naputak: može se uzeti kao da je između leća i sloja kovine tanka vrsta uzduha, koja poput planparalelne ploče ne bi lomila svjetlosti.) [50 cm]

282. Pogreške optičkih slika. Dosele se uzimalo, da su zrake svjetlosti samo malo priklonjene prema osi sfernoga zrcala ili leće. U praksi treba se služiti i kosima zrakama. Tako kad fotografiramo, puštamo u fotografsku spravu i široke svežnje zraka, pa su krajnje zrake u kameri znatno priklonjene. Od fotografiranih točaka, koje leže postrance, sadržavat će i uzak svežanj samo kose zrake. U takvim primjerima jedna jedina leća ne može načiniti dosta oštre slike.

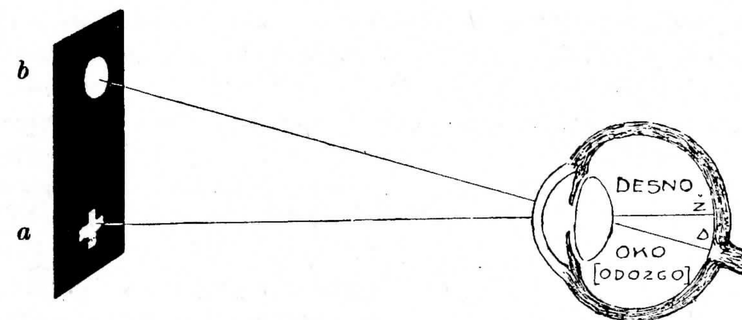
Zrake širokoga svežnja, koji izlazi iz točke S na osi leće, ne sastaju se poslije loma ni približno u jednoj točki i nastaje pogreška t. zv. aberacije (u drugom se značenju spomenuo taj naziv u § 269.). Sastavljanjem više leća može se ta pogreška ukloniti, no ona će ipak onda još preostati za sve ostale točke, pa bile one i blizu S. Ako je uspjelo, da se dobije dosta oštra slika ne samo od točke S nego i od točaka, koje su blizu S u ravnini okomitoj na os, točka se S i njezina slika zovu aplanatične (α, niječna čestica; πλανάομαι, *lutam*). Nikada se ne mogu dobiti oštre slike od sustava točaka, koje ispunjavaju makar malen obujam. Što se ipak u optičkim spravama dobivaju slike, s kojima se možemo zadovoljiti, valja pripisati tomu, što oko nije savršeno i ne može razlikovati sitnih tančina.

Ako iz svjetle točke izađe uzak svežanj zraka i prođe kroz leću vrlo koso, zrake poslije loma nisu ni približno homocentrične. Svaka se zraka onda presijeca u dvije točke susjednim zrakama (ali ne svima). Te se točke zovu fokalne točke one zrake, a sam svežanj zraka astigmatičan (α, niječna čestica; στίγμα, *točka*). Ako je pošlo za rukom, da se načini optički sustav, u kojem su na svakoj zraci obje fokalne točke združene, kažemo, da je astigmatizam uklonjen („anastigmat"!). — Od svjetloga predmeta, koji je rasprostrt u ravnini okomitoj na optičku os, izlazi slika, koja — općeno uzeto — leži na obloj plohi, pa na ravnom zastoru ne će biti slika oštra. Zadaća je optičke tehnike, da se ukloni ta krivost slike. — Još onda preostaje pogreška, da slika nije vjerna: pravac je u slici izobličen, pa se od četvorine dobije slika s pupčastim („kao bačva") ili opet s ugnutima („kao jastuk") stranicama. Optički sustav, koji je prost od te pogreške, zove se ortoskopičan (grč. ὀρθός, *uspravan*).

283. Oko. Oko je najznatnija optička sprava. Kroz prozirnu rožnicu svjetlost ulazi u prednju očnu izbicu, u kojoj je tekućina, t. zv. izbična vodica. Odatle ide kroz zjenicu ili pupilu (lat.), koja je okrugao otvor u šarenici (iris, grč. ἶρις, *duga*), pa onda kroz kristalnu leću u hladetinastu stakleninu. Najposlije udari svjetlost na mrežnicu ili retinu, koja je razgranjeni završetak vidnoga živca (lat. *rete, mreža;* „poput mreže" prozvao je mrežnicu Herofil, Ἡρόφιλος, oko g. 300. pr. Kr.). Granice sredstava, što ih zraka svjetlosti u oku prodire, približno su sferne plohe; lomom na tim granicama nastaje od svjetloga predmeta obrnuta slika na mrežnici. (Ta se činjenica upoznala tek krajem 16. vijeka, pa su sliku doista i pokazali na mrežnici životinjskoga oka.)

Ako se sjaj nekoga predmeta poveća, zjenica se smanji, da ne bi odviše svjetlosti unilazilo u oko; rasvjeta se mrežnice dakle ne mijenja toliko, koliko sjaj izvanjih predmeta.

Najosjetljivija je točka mrežnice žuta pjega i poglavito jamica usred te pjege. Kada motrimo neki predmet, upravljamo vrtnjom oko tako, da slika predmeta padne na tu jamicu; za sve točke, kojih slike padnu izvan žute pjege, kažemo, da ih vidimo indirektno. Od žute pjege bliže prema drugom oku nalazi se slijepa pjega, mjesto, gdje u oko ulazi vidni živac; to je mjesto slijepo. Otkrio ga je Mariotte (1668.) ovim pokusom: ako desnim okom motrimo križić a (sl. 341.), pa mu je slika na



Sl. 341.

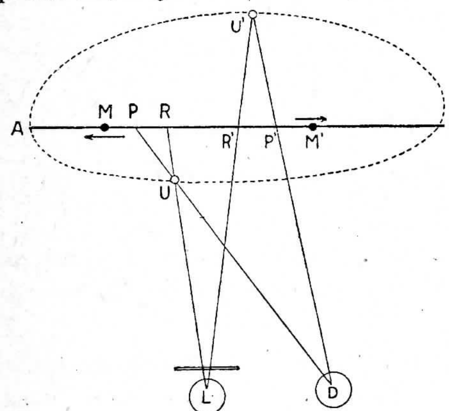
žutoj pjezi $ž$, a točku b, koja je nadesno od a, vidimo indirektno, kod izvjesne će daljine oka točka b za oko iščeznuti. To je onda, kad slika točke b padne na slijepu pjegu s.

Da oko uzmogne oštro vidjeti predmete u različitim daljinama, treba da se priudesi ili akomodira (lat. *accomodo, prilagođujem*). U tu se svrhu osobitim mišićima mijenja oblik kristalne leće. Ako leća nije napeta, onda u dobrovidnom oku beskrajno udaljeni predmet daje oštru sliku; za motrenje bližih predmeta treba da se leća odeblja. Koje su granice akomodacije, može se ispitati Scheinerovim pokusom. (1610.) U papiru su dvije rupice, kojih je razmak manji negoli promjer zjenice; kad gledamo kroz te rupice iglu okomitu na spojnicu rupica, vidimo iglu jednostavno i oštro, ako je u daljini, na koju možemo akomodirati, dok je inače vidimo dvostruko i mutno. Moć priudešavanja mijenja se sa starošću. Dijete 10-godišnje može akomodirati od kojih 7 cm udaljenosti do beskrajne daljine, 40-godišnji čovjek od 22 cm do beskrajne daljine. U višoj dobi dolazi starovidnost, gdje je najbliža točka, što je oko može oštro vidjeti, već znatno odmakla ispred oka. Još kasnije može oko akomodirati i na imaginarne svjetle točke iza sebe, što je dakako bez koristi. Najposlije oko ne vidi više oštro nijedne točke ispred sebe.

Od sposobnosti priudešavanja treba razlikovati oštrinu vida. Osjetljivi dio mrežnice jesu piljci i štapići; kad je oko prilagođeno ili adaptirano (lat. *aptus, prikladan*) na svjetlost, posao gledanja vrše piljci. Dvije svjetleće točke, koje su toliko razmaknute, da im slike padnu na isti piljak, ne pričinjaju nam se različne. Razmak je piljaka u žutoj pjezi

otprilike 0·005 mm; tome odgovara oštrina vida, prema kojoj možemo razlikovati točke, kojima je prividni razmak 1'; ako je predmet velik 1 m, ne smije mu daljina biti veća od 3440 m, ako želimo točke predmeta razlikovati. — Oštrina je vida dakle ograničena samom gradnjom mrežnice, pa zato nije ni nužno, da leća sabire zrake baš točno na mrežnici. Doista to ni ne biva ni u kojem slučaju. — Poradi načina, kako je leća oka učvršćena, postoji u njoj osobita napetost; otuda dolazi, da sjajnu točku vidimo kao zvijezdu sa 4 ili 8 trakova. Time se tumači i pojav iradiacije, koji se očituje u tom, da sjajnu plohu vidimo nešto povećanu; sjajni srp mjesečev pričinja nam se kanda pripada većemu krugu nego preostali dio Mjeseca (koji je rasvijetljen Zemljom). (Lat. *irradio, obasjavam*).

Kad predmet, koji je dosta blizu, motrimo sa dva oka, slike su ponešto različne, jer je jedno oko od drugoga razmaknuto. Toj nejednakosti zahvaljujemo, da predmete vidimo prostorno ili plastično. Prema onoj točki predmeta, koju baš motrimo, uperene su osi očiju (os je pravac, koji ide kroz sredinu zjenice i sredinu žute pjege); oči onamo „konvergiraju" i ta nam se točka pričinja jednostruka, dok nam se indirektno gledane točke uopće pričinjaju dvostruke. Na to obično ne pazimo, ali se to može lako opaziti. — Moć se plastičnoga gledanja u izvjesnoj daljini gubi, te ne seže preko koje stotine metara. To je u svezi s granicom oštrine vida.



Sl. 342.

Zanimljiv pojav opažamo, ako pred jedno oko stavimo bojadisano staklo i s oba oka gledamo tijelo, koje se giblje amo tamo u pravcu *AB* (sl. 342.); čini nam se, da tijelo opisuje krivulju, kojoj je jedan dio ispred onog pravca, drugi straga. Ako se staklo premjesti pred drugo oko, prividna vrtnja ide obrnutim smjerom. Tumači se taj pojav time, što oćut svjetlosti zakašnjava za podražajem, a zakašnjava tim većma, što je podražaj slabiji. Bojadisano staklo oslabljuje svjetlost, pa će u oku, pred kojim je staklo, oćut više zakasniti, negoli kod prostog oka. Ako je dakle staklo ispred lijevog oka *L* (sl. 342.), a tijelo dolazeći s desne strene na putu stigne u točku *M*, desno će oko *D* u taj čas vidjeti tijelo radi zakašnjenja oćuta na mjestu *P*, a lijevo oko s još većim zakašnjenjem t. j. u *R*. Sastavljajući oćute lijevoga i desnoga oka mislimo, da je tijelo tamo, gdje se doglednice *DP* i *LR* presijecaju, t. j. u točki *U*, a ta je ispred *AB*. Slično tumačimo, zašto tijelo vidimo iza njegove staze, na pr. u *U'*, kad tijelo ide s lijeve strane nadesno, i zašto se vrtnja obrne, kad staklo stavimo pred desno oko. — Opisani pojav može se pokazati i bez stakla, ako svjetlost u jednom oku time oslabimo, da okom žmirimo. Spomenut ćemo još, da ne valja pogledom pratiti tijela, nego treba uprijeti pogled u čvrstu točku, tako da tijelo motrimo indirektno. (Pulfrich 1922.)

Zjenica se pričinja crna, jer ne odrazuje svjetlosti. Gledajući neposredno u tuđe oko zastiremo svjetlost, pa to oko nije iznutra rasvjetljeno. Oftalmoskop je sprava, s pomoću koje i rasvjetljujemo i motrimo unutarnjost oka (grč. ὀφθαλμός, *oko*). (Helmholtz 1850.)

Oćut svjetlosti traje dulje negoli sama svjetlost. Poradi toga kada komad žeravice vrtimo brzo u krugu, vidimo neprekidnu kružnicu. — Ako bacimo pogled na Sunce blizu horizonta, a onda ga uperimo na drugo mjesto neba, vidimo tamnu mrlju; dio mrežnice, na koji je pala slika sunčana, izmorio se, pa ne može osjećati svjetlosti kao ostala mrežnica.

Kao primjer za optičke varke neka služi slika 150. na str. 137., koja prikazuje Kelvinov kompas; premda su crte, koje predočuju paralelne magnetiće, ravne, ipak se pričinjaju zakrivljene; varka nastaje poradi radialnih niti. Kola Curtisove turbine (sl. 143. na str. 130.) razumije se da su posvuda jednako debela, pa ipak nam se pravci, kojima su kola predočena, ne čine usporedni. — Promjer bikonkavne leće *g* u sl. 336. čini nam se veći od promjera bikonveksne leće *d*, premda su ti promjeri jednaki.

Nije dosta objašnjeno, zašto nam se Mjesec blizu horizonta pričinja veći negoli kad je visoko; zašto se gotovo svima ljudima Mjesec nameće kanda ima veličinu tanjura od kojih 20 cm promjera; zašto se horizont nebeskoga svoda čini udaljeniji nego zenit. Čovjek, koji se udaljuje, isprva nam se ne pričinja manji, premda ga gledamo pod sve manjim vidnim kutom; tek u daljini od nekoliko km vidimo ga kao patuljka.

Oko u tami se adaptira na tminu; drži se, da posao gledanja umjesto piljaka preuzimlju štapići. Dok piljaka imade najviše u žutoj pjezi, te je ona najosjetljivije mjesto kod običnoga gledanja, štapića u žutoj pjezi nema, pa je žuta pjega u tmici slijepa. Pojavi li se dakle u tmici kakva slaba svjetlost, ne ćemo je vidjeti direktnim gledanjem; mi je vidimo tekar kad pogled od nje odvrnemo.

Nauka, koja ispituje djelovanje oka, zove se fiziološka optika.

Zad. **233.** Načinite Mariotteov pokus a) kao u sl. 341. b) za mjesečine, tako da Mjesec indirektno gledan iščezne.

Zad. **234.** Protumačite ovaj pokus: ako s oba oka motrim šiljak olovke, vidim plamen svijeće, koja je iza šiljka, indirektno i dvostruko; približim li šiljak dovoljno k licu, te je na zgodnu mjestu, plamen iščezne za oba oka. (Picard 1740.)

Zad. **235.** Načinite Scheinerov pokus.

Zad. **236.** Dovedite oko u mjesto *A* sobe i odredite, koje skrajnje točke *B* i *C* lijevo i desno na zidu možete bez kretanja glave direktno motriti. Sastavite *A* i *B* koncem, tako isto *A* i *C* i izmjerite kut *BAC*.

284. Naočari. U kratkovidna je čovjeka očna jabučica u smjeru osi oka preduga, pa slika beskrajno udaljena predmeta nastaje ispred mrežnice. Ako se leća rastresača zgodne jakosti stavi ispred oka, slika se beskrajno udaljena predmeta pomakne na mrežnicu. Prekovidno oko ima prekratku jabučicu, pa slike bližnjih predmeta padnu iza mrežnice. Prekovidnom se i starovidnom oku pomaže lećom sabiračom. — Do nedavna obično se upotrebljavahu u naočarima simetrične leće t. j. bikonkavne ili bikonveksne sa sfernim plohama jednakih krivosti. No takve leće daju loše slike,

kad gledamo postrance, t. j. kad u oko ulazi svežanj zraka, koji prodire leću naočara blizu ruba. Takav je svežanj kod simetričnih leća astigmatičan (§ 282.). Leće periskopične (περί, *naokolo*) ne pokazuju astigmatizma; njihove su sferne plohe obje konkavne prema oku (Hyde 1804.).

Ima naočara sa „dvožarišnima" lećama (Franklin 1785.); donji dio leće služi pri čitanju i t. d., gornji, koji ima drugu žarišnu daljinu, pri gledanju u daljinu.

Plohe oka, u kojima se svjetlost lomi, nisu točno kuglaste. Otuda dolazi, da je svako oko bar nešto astigmatično. Ako motrimo sliku, u kojoj su nacrtani vertikalni i horizontalni pravci, koji se presijecaju, pa ako priudesimo oko, da oštro vidi vertikalne pravce, ne će u isti mah izaći i horizontalni pravci oštri. Ako je astigmatizam znatan, treba mu doskočiti osobitim naočarima, na pr. sferocilindričkim lećama (jedna ploha sferna, druga valjkasta).

Naočare izumiše u Italiji potkraj 13. vijeka.

Zad. 237. Neko prekovidno oko ne vidi oštro na daljinu manju od 1 m; kakvu leću treba staviti 1·5 cm daleko ispred oka, da oko oštro vidi još i predmet udaljen 25 cm?

Naputak. Leća treba da od predmeta, koji je od nje udaljen za $a = 25 - 1{\cdot}5$ cm $= 0{\cdot}235$ m, načini sliku na istoj strani u daljini $b = -0{\cdot}985$ m.

[jakost leće $= + 3{\cdot}24$ dioptrije]

Zad. 238. Kratkovidno oko ne vidi oštro na daljinu veću od 76·5 cm; kakvu leću treba staviti 1·5 cm daleko ispred oka, da oko vidi do najveće udaljenosti?

[jakost $= - 1{\cdot}33$ dioptrije]

285. Fotografska sprava. Ako se otvor tamne izbe (§ 268.) poveća toliko, da u nj pristaje leća sabirača, može se na suprotnoj stijeni dobiti slika izvanjega predmeta (della Porta 1589.). Ako je na toj stijeni takva tvar, koja se utjecajem svjetlosti kemijski mijenja, može se slika sačuvati. Na tom se osniva izum fotografije (poglavito Talbot 1839.; grč. φῶς, *svjetlost*).

Fotografska ploča jest staklena ploča prevučena tankim slojem želatine sa srebrovim bromidom (takvu je suhu ploču izumio Maddox 1871.). Ako na tu ploču kroz primjereno vrijeme pada slika izvanjega predmeta, pa ako iza toga u tamnoj prostoriji (fotografskoj „tamnoj sobi") na ploču kemijski djeluje razvijač, svagdje se, gdje je prije djelovala svjetlost, izluči srebro i ploča na tim mjestima potamni. Iza toga se slika „ustali" ili fiksira t. j. preostali se nerastvoreni srebrov bromid kemijskim putem ukloni. Ploča onda predočuje negativnu sliku ili negativ; gledamo li kroz negativ, ona su mjesta, koja pripadaju svjetlim točkama predmeta, neprozirna, tamna, dok tamnim mjestima predmeta odgovaraju prozirna, svjetla mjesta negativa. Da se dobije pozitivna kopija negativa, položi se negativ na papir osjetljiv za svjetlost, oboje izloži svjetlosti, a iza toga se osjetljivi papir opet fiksira. — Fotografski film (engl. *kožica*).

Da bude fotografija dobra, treba da je fotografski objektiv sastavljen od više leća, da se uklone ili smanje različite pogreške slike. (Kod dalekozora zove se objektiv leća, koja je okrenuta prema predmetu,

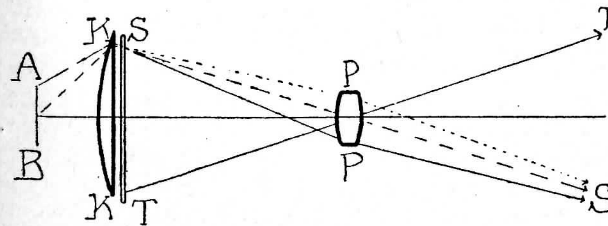
objektu, a okular leća okrenuta prema oku; budući da kod fotografske sprave osim leća objektiva nema drugih leća, naziv je objektiv ovdje ponešto nezgodan.) U fotografskoj se spravi a i drugdje upotrebljava za ograničenje svežnja zraka t zv. iris-zaslon, kojemu se okrugli otvor lako poveća ili smanji kao i zjenica u šarenici (iris) našega oka.

Nebrojene su primjene fotografije. Dalekozor u svezi s fotografskom spravom otkriva zvijezde, kojih oko s istim dalekozorom ne bi vidjelo. — Fotogrametrija uči, kako se izmjerivanjem fotografija snimljenih s različitih mjesta mogu odrediti protege zgrada, krajeva i t. d., pa se primjenjuje u graditeljstvu, geodeziji i t. d. — Trenutna ili momentna fotografija.

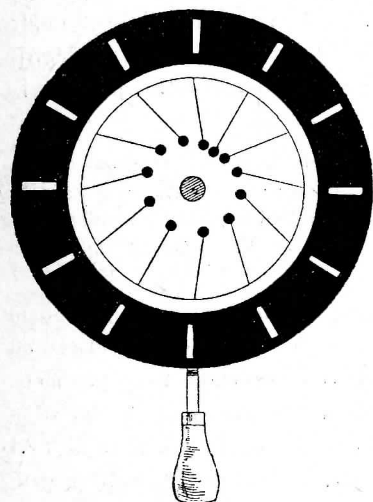
Namještaj točaka predmeta vidimo iz različitih daljina različit. Fotografija pričinja nam se samo onda vjerna, ako oko (točnije: okretište očne jabučice) stavimo tako daleko od fotografije, da bi svaka točka fotografije mogla oku sakriti korespondentnu točku predmeta. Drugima riječima: središte perspektive treba da je u oku, dok je kod fotografiranja vrijedila kao središte perspektive sredina leće. Fotografiju treba dakle staviti u onaj razmak od oka, kolik je bio u fotografskoj spravi razmak ploče od leće. No ako je taj razmak malen, na pr. 10 cm, dobrovidno oko ne može na nj akomodirati, ne može dakle motriti fotografije iz valjane udaljenosti. Tome se može odmoći, ako se fotografija motri kroz leću onolike žarišne daljine, kakvu je imao objektiv fotografski. Kako kroz tu leću idu i znatno priklonjeni svežnji zraka, trebalo joj je sastav osobitim računima odrediti; verant (lat. *verus istinit;* Gullstrand, Rohr oko 1900.).

286. Projekcijona sprava. Od fotografija snimljenih na staklu, t. zv. diapozitiva, mogu se projekcijonom spravom načiniti velike slike na bijelom zastoru. Svjetlost, što izlazi iz jakoga izvora AB (sl. 343.), osobitom se lećom, t. zv. kondenzorom K navraća kroz diapozitiv ST u drugu leću PP, koja načini na zastoru realnu sliku $S'T'$. Diapozitiv nalazi se što blize kondenzoru. Zrake, što iz kojegod točke diapozitiva izlaze, potječu od različitih točaka svjetloga izvora (isp. sl.).

Da se uklone pogreške slike, treba uzeti umjesto jedne leće PP više njih, pa se PP zove projekcioni sustav. Kao projekcioni sustav može služiti fotografski objektiv, kroz koji onda treba da zrake idu obrnutim smjerom negoli u fotografskoj spravi; ona strana sustava, što je u fotografskoj spravi okrenuta prema osjetljivoj ploči, treba da je kod projiciranja okrenuta prema diapozitivu. — Kondenzor baca sliku izvora



Sl. 343.



Sl. 344.

svjetlosti AB na mjesto PP. I kondenzor se sastavlja od 2 ili 3 leće; među njima se često nalazi staklena posuda s vodom („vođena komora"), koja upija toplinske zrake (§ 311.).

Projekcionu spravu izumiše u 17. vijeku (*laterna magica, čarobna svjetiljka*), ali se umjeća projiciranja razvila tek u novije vrijeme, otkad ima jeftinih jakih izvora svjetlosti i otkad su se dotjerale fotografske leće.

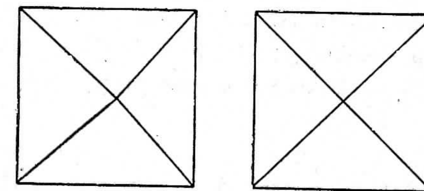
287. Kinematograf. Preteča je kinematografa stroboskop (grč. στρόβος, *što se vrti*). Okrugla ploča, koja se može vrtjeti poput kola, imade duž periferije jednako razmaknute rupice na pr. njih 12 (sl. 344.); svakoj je rupici dodana po jedna slika predmeta, kojega gibanje hoćemo stroboskopski prikazati (na pr. slike njihala u različitim fazama); te slike pripadaju časovima, koji su jedan od drugoga jednako udaljeni. Ploču okrećemo između zrcala i oka, tako da pred okom prolaze rupice, te kroz rupice gledamo slike u zrcalu. Kojagod slika A vidi se samo u onom kratkom vremenu, dok rupica prolazi ispred oka; onda se slika zastre, no već iza kratkoga vremena dođe slijedeća rupica pred oko, pa se na mjestu, gdje je bila prije slika A, vidi sada slijedeća slika, te nehotice obje slike poistovetujemo ili identificiramo („varka identificiranja") i mislimo, da vidimo sliku, koja se mijenja. Slike redovno slijede tako brzo jedna za drugom, da se svaka slika slije sa slikom pređašnje (Plateau 1832., Stampfer 1832.). — Nedostatnost je te sprave u tom, što rupice imadu širinu, pa dok gledamo kroz rupicu, slika se pomiče i utisci se njezini donekle pobrkaju. — Malo se predmeta tako jednostavno giblje, da se dadu crtnjom načiniti slike predmeta zgodne za stroboskop; tekar trenutnim fotografiranjem dobiveni su zgodni nizovi slika zamršenijih gibanja (Muybridge 1877.).

Kinematografske se slike projiciraju, te ih može mnogo ljudi najedamput vidjeti. Kinematografski se „film" pomiče na mahove (mehanizam „malteškoga križa", Marey). Dok slika stupa na mjesto druge, svjetlost je zastrta, a za vrijeme projiciranja slika miruje. Svake se sekunde obreda na pr. 24 slika. Iskustvo je pokazalo, da uz ovu maleņu frekvenciju kinematografska slika ne bi bila dosta „mirna"; u drugu ruku frekvencija se ne da povećati, jer bi akceleracija kod pomicanja izašla tolika, da bi film stradao. Poradi toga se sličica ne projicira kroz sve vrijeme svoga mirovanja, već se projiciranje 1 ili 2 puta prekine, pa se svaka sličica projicira 2 ili 3 puta, a onda tek ustupi mjesto narednoj sličici.

Ako je kinematografski film nastao na taj način, da se neki pojav snimio na pr. 500 puta u sek, a film se projicira običnom brzinom na pr. 20 puta u sek, brzina je u projekciji 20 : 500 = 1/25 prirodne brzine. Pojav se u projekciji može onda pratiti u tančine, kojih, neposrednim motrenjem ne razaznajemo. Govorimo o vremenskoj lupi, jer što je kratkotrajno, motrimo u dugom vremenu, kaošto lupa (§ 292.), što je prostorno sitno, prikazuje veliko. — Obratno: spori događaji, na pr. rastenje biljke, mogu se kinematografski prikazati ubrzano.

U zvučnom filmu (g. 1926.) nalazi se uz niz sličica, koje se projiciraju, neprekidan, 3 mm širok trak, koji nosi fotografirane utiske zvuka. Kod „amplitudnoga pisma" ti su utisci predočeni valovitom krivuljom, čije elongacije odgovaraju titranju zvuka; ta krivulja luči spomenuti zvučni trak u crn i proziran dio. Kod „intenzitetnoga pisma" zvučni se trak sastoji od poprečnih, nejednako prozirnih pruga. Kod snimanja zvuk puštamo u mikrofon, a mikrofonskim strujama utječemo bilo na širinu bilo na jakost svjetlosti, koja pada na film. Kod projiciranja u posebnoj se spravi pušta svjetlost kroz zvučni trak na fotoelektričnu stanicu; time se mijenja jakost jedne električne struje i ta struja pušta u zvučnik, gdje stvara zvuk. Na gotovom filmu utisak zvuka ne nalazi se odmah do sličice, koja mu pripada, već je od nje udaljen za propisan broj centimetara. To je zato jer film, kada se projicira, miruje, dok zvučni trak mora putovati stalnom brzinom, pa se ne može komadić filmske vrpce u isti čas upotrebiti i za stvaranje slike i za reprodukciju zvuka.

288. Stereoskop. Stereoskop služi tome, da se slike vide prostorno. U tu se spravu umeću po dvije fotografije istoga predmeta jedna do druge (stereogram); desna prikazuje predmet, kakav se pričinja desnom oku, dok je lijeva snimljena prema lijevom oku. Kada motrimo sam predmet, osi očiju konvergiraju prema točkama predmeta; kad gledamo stereogram, desno oko treba da gleda desnu sliku, lijevo istodobno lijevu. Kako su korespodentne točke tih slika razmaknute otprilike koliko i same oči, trebalo bi dakle gledati usporednim smjerovima. Teškoća je pri tom, što su oči navikle, da kod usporednoga gledanja akomodiraju na beskrajnu daljinu, dok kod stereograma treba akomodirati na blizinu. Zato nije baš lako uvježbati oči, da bez pomagala valjano motre stereogram; bez muke motrimo stereogram u stereoskopu (Wheatstone 1833.). — Neke su vrsti stereoskopa tako udešene, da se desnom oku pruža na motrenje lijeva slika stereograma, lijevom desna. I takvi se stereogrami mogu motriti bez stereoskopa, ako škiljimo. Za motrenje stereograma sl. 276. na str. 241. treba pred jedno oko staviti zgodnu prizmu, koja sliku okrene. — Bez fotografiranja lako pravimo stereoskopije geometrijskih tjelesa. Sl. 345. (smanjena) prikazuje stereoskopiju piramide, kojoj je vrh okrenut *prema* motriocu, ako lijevim okom gleda lijevi lik, desnim desni, a *od* motrioca, ako lijevim okom gleda desni lik, desnim lijevi.



Sl. 345.

289. Holandijski ili Galilejev dalekozor. Zadaća je dalekozora ili durbina (perzijska riječ) ili teleskopa, da predmete, koji nam se poradi velike daljine ukazuju u malenom vidnom kutu, prikaže u velikom kutu. Prvi su dalekozor sastavili oko g. 1600. u Holandiji; Galilei doznavši za to i sam ga je nanovo izumio (1609.). Holandijski ili Galilejev dalekozor složen je od leće sabirače s velikom žarišnom daljinom i leće rastresače s malenom žarišnom daljinom. Prva je objektiv, druga okular (isp. § 285.), te je jedna na početku a druga na kraju cijevi. Treba pripaziti, da leće dalekozora budu valjano centrirane; to će reći središta svih sfernih ploha leća treba da leže na istom pravcu, „osi" dalekozora. Kad se dobrovidno oko služi dalekozorom, da vidi vrlo udaljen predmet, udesi se tolik razmak leća, da se stražnje žarište s (sl. 346.a) jedne i druge leće podudara. Ako je dakle žarišna daljina objektiva f cm, žarišna daljina okulara φ cm (uzeto pozitivno), razmak je objektiva od okulara $f-\varphi$ cm; to je onda i dužina dalekozora. Sam bi objektiv od silno dalekoga predmeta ST načinio sliku st realnu i obrnutu pri žarištu s; no prije negoli ta slika nastane, udare zrake na okular. Za okular je st imaginiran svjetao predmet, pa kako je on u žarištu, nastaje od njega slika $S'T'$ u silnoj daljini. Veličina se slike određuje time, što točke T i t treba da leže na pravcu, koji ide kroz sredinu objektiva, a T' i t na pravcu, što ide sredinom okulara. Priklon ω prvoga pravca prema osi je prividna veličina predmeta ST za prosto oko, priklon ω' drugoga pravca je prividna veličina u dalekozoru. Budući da je $st = f \cdot tg\omega = \varphi \cdot tg\omega'$, izlazi $tg\omega' : tg\omega = f : \varphi$ ili — kako su ω i ω' maleni —

$$\frac{\omega'}{\omega} = \frac{f}{\varphi}.$$

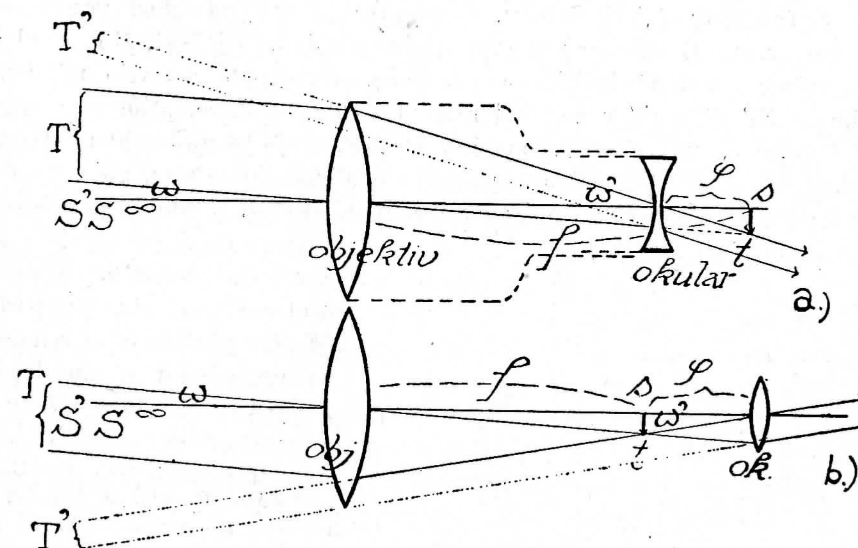
Taj se omjer zove uvećanje dalekozora. Uvećanje se može odrediti pokusom, ako udaljenu ljestvicu motrimo jednim okom kroz dalekozor, drugim neposredno, pa prebrojimo, koliko se dijelova ljestvice gledane prostim okom podudara s jednim dijelom ljestvice u dalekozoru. — Obična su „kazališna stakla" sastavljena od dva Galilejeva dalekozora.

Zad. **239.** Zašto mora kratkovidno oko okular približiti objektivu?

Zad. **240.** Galilejev dalekozor, koji povećava $2\frac{1}{2}$ puta, ima dužinu 10 cm; kolike su žarišne daljine njegovih leća? [$16\frac{2}{3}$ cm, $6\frac{2}{3}$ cm]

290. Keplerov dalekozor. Kepler je zamislio (1611.) dalekozor sastavljen od dvije sabirače. Kad dobrovidno oko motri kroz taj dalekozor beskrajno udaljen predmet ST, udesi se, da se stražnje žarište s objektiva podudara s prednjim žarištem okulara (sl. 346. b). Za razliku od Galilejeva dalekozora sada okular od slike st načini u silnoj daljini sliku $S'T'$, koja je s obzirom na predmet ST obrnuta. Kod astronomskih i gdjekojih drugih opažanja okrenuta slika ne smeta, a važan je taj „astronomski" ili

Keplerov dalekozor, jer se u zajedničko žarište leća može staviti križ od niti, koji služi kao stalan znak u vidnom polju. Uz oznake pređašnjega §



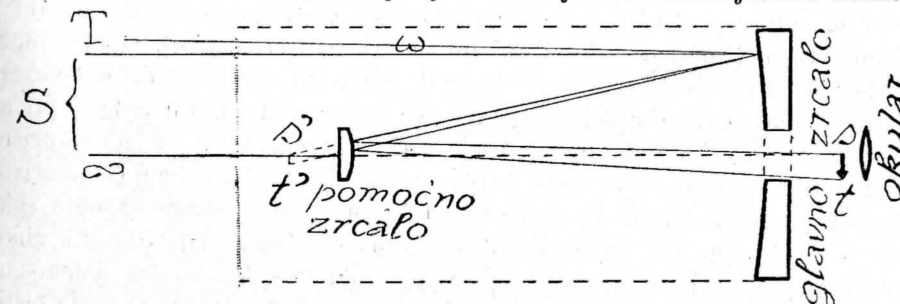
Sl. 346.

dužina je Keplerova dalekozora $f+\varphi$, a za uvećanje vrijedi ista formula kao i kod Galilejeva dalekozora.

Zad. **241.** Ako danju objektiv astronomskoga dalekozora okrenemo prema nebu, tako da je dobro rasvjetljen, načini okular realnu sliku objektiva, koju možemo uhvatiti na papiru; pokažite, da se uvećanje može dobiti, ako se promjer objektiva razdijeli s promjerom te slike.

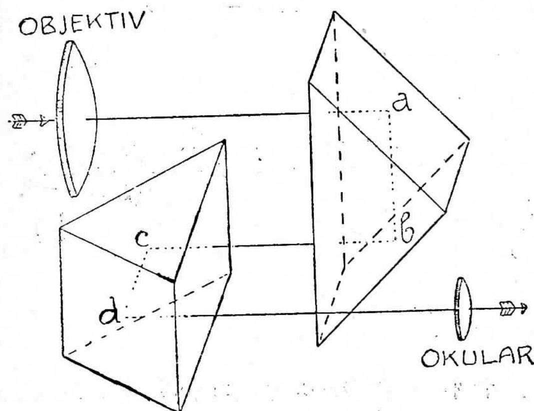
Zad. **242.** Dalekozorom motrimo zvijezdu, a iza toga uperimo ga na predmet udaljen 1000 m; koliko treba pomaći okular, *a)* ako je žarišna daljina objektiva 1 m, *b)* ako je žarišna daljina objektiva 10 m? [*a)* za 1·0 mm, *b)* za 101 mm]

291. Druge vrsti dalekozora. U drugoj polovici 17. vijeka stadoše upotrebljavati dalekozore, u kojih je leća objektiva nadomještena konkav-



Sl. 347.

nim zrcalom. (Koja im je prednost, v. u § 296.) Takav dalekozor zove se r e f l e k t o r („koji odbija“), dok se Keplerov dalekozor onda zbog opreke zove r e f r a k t o r („koji lomi“). Suvremeni veliki reflektori grade se u glavnom prema C a s s e g r a i n o v u načinu (1672.). Svjetlost, što se odbija na „glavnom zrcalu“ reflektora (sl. 347.), stvorila bi od vrlo udaljenog predmeta *ST* sliku *s't'* u žarišnoj ravnini zrcala, no zrake, prije nego stignu do te ravnine, udare na „pomoćno zrcalo“, koje je pupčasto i tako namješteno, da zrake tek nakon dužega puta stignu do mjesta, gdje stvaraju realnu sliku *st*. Ta se slika motri okularom. U sl. 347. predočen je reflektor, kojemu je glavno zrcalo u sredini p r o b u š e n o. Može se uzeti glavno zrcalo i p o t p u n o, pa se onda zrake iza refleksije na pomoćnom zrcalu drugim pomoćnim zrcalom izvedu iz osi dalekozora.



Sl. 348.

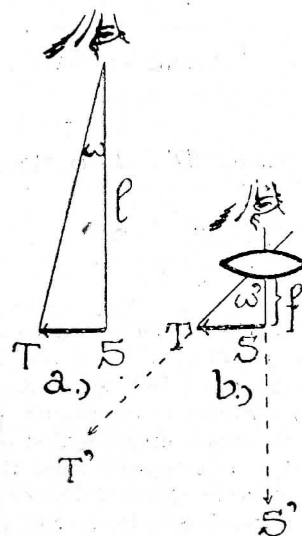
Glavno je zrcalo velikih Cassegrainskih reflektora parabolično, pomoćno zrcalo hiperbolično. — Poimence je tako načinjen dalekozor, koji je po širini najveći, a to je reflektor na Mount Wilsonu u Kaliforniji (dovršen oko 1917.); njegovo je glavno zrcalo široko 2·56 m („100 palaca“), a ima žarišnu daljinu 12·9 m. — Na Mt Palomar, također u Kaliforniji, dovršava se još veći reflektor: od „200 palaca“, kojemu glavno zrcalo ima promjer 201 palac, a debljinu 21 palac u sredini, 25 palaca na rubu; žarišna je daljina toga zrcala blizu 17 m.

Vidno je polje Keplerova dalekozora jednoliko rasvjetljeno, dok rasvjeta u vidnom polju Galilejeva dalekozora opada prema rubu. Nedostaci se Keplerova dalekozora, da je dugačak i da predmete obrnuto pokazuje, uklanjaju tako, da u dalekozor umeću p r i z m e (P o r r o 1850.). Onda u dalekozoru zraka svjetlosti ide od objektiva do okulara slomljenim putem, kako se vidi iz sl. 348.; zraka se na tom putu dva puta totalno odbija u jednoj prizmi (točka *a* i *b*) i dva puta u drugoj (točka *c* i *d*). Okular može dakle biti blizu objektiva, ako i jest put zrake od objektiva do dalekozora dug. Prizme su tako namještene, da je ravnina refleksije u jednoj prizmi okomita na ravnini refleksije u drugoj. Ako se refleksijom u jednoj prizmi slika obrne smjerom gore-dolje (isp. zad. 202. § 270.), u drugoj će se prizmi obrnuti još i smjerom lijevo-desno, tako da obje prizme zajedno sliku s a s v i m okrenu, pa kako obični Keplerov dalekozor daje obrnutu sliku, dalekozor će s prizmama dati u s p r a v n u sliku. — Ako se dva dalekozora s prizmama sastave u spravu određenu za oba oka, mogu se namjestiti

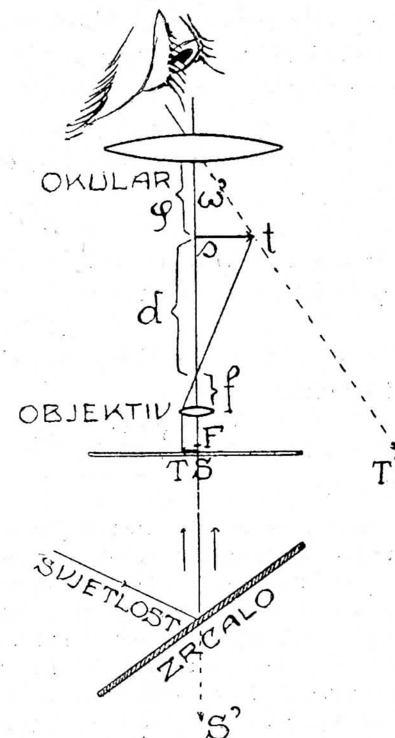
tako, da budu središta objektiva više razmaknuta negoli zjenice očiju; takvim dalekozorom možemo onda p r o s t o r n o vidjeti do veće daljine negoli običnim kazališnim staklom.

Astronomski dalekozori treba da pokazuju zvijezde na različitim mjestima neba. Zato se namještaju tako, da su pomični. No time su stavljene granice dužini dalekozora i njegovu uvećanju. Zato je u novije vrijeme izvedeno nekoliko dalekozora velike dužine, koji m i r u j u bilo u horizontalnom položaju bilo vertikalno, a služe ispitivanju Sunca. Sunčana se svjetlost redom tako odbije na dva ravna zrcala, da uđe u dalekozor; spomenuta dva zrcala čine t. zv. c e l o s t a t (lat. *coelum, nebo*); jedno se kreće urom i to oko osi, koja leži u ravnini zrcala, a pokazuje prema nebeskom polu, drugo je zrcalo mirno. Treba uzeti d v a zrcala, jer se samo tako dade postići, da se slika Sunca u dalekozoru ne vrti. Veliki „t o r a n j - d a l e k o z o r“ na Mount Wilsonu, sagrađen 1910., visok je 50 m nad zemljom, a nastavlja se vertikalnim rovom u zemlju još do dubljine 25 m.

292. Sitnozor. Da tančine predmeta što bolje razaberemo, približujemo ga oku do najbliže točke, na koju oko može akomodirati; onda je za prosto oko kut, u kojem predmet vidimo, najveći. Želimo li vidni kut još i preko toga povećati, treba nam s i t n o z o r ili m i k r o s k o p. Za omanja uvećanja uzimljemo l u p u (franc. *loupe*). Lupa ili j e d n o s t a v n i s i t n o z o r u najjednostavnijoj je izvedbi leća sabirača. Čovjek s dobrovidnim okom



Sl. 349.



Sl. 350.

toliko približuje lupu predmetu ST (sl. 349. b), da predmet dođe u njezinu žarišnu ravninu; onda oko vidi uspravnu sliku $S'T'$ u silnoj daljini. Kod dobrovidnoga oka srednje starosti najmanja je daljina oštroga vida l otprilike 25 cm. Predmet dužine ST može takvo oko vidjeti najviše u vidnom kutu ω radijana, gdje je (sl. a) $ST = l \cdot \omega$. Ako lupa imade žarišnu daljinu f cm, oko će vidjeti sliku $S'T'$ u vidnom kutu ω' radijana (sl. b), koji je tolik, da izlazi $ST = f \cdot \omega'$. Ispoređivanjem dobiva se $f\omega' = l\omega$, dakle je uvećanje

$$\frac{\omega'}{\omega} = \frac{l}{f}.$$

Uvećanje je dakle upravno razmjerno najmanjoj daljini oštroga vida i upravno razmjerno jakosti lupe $1 : f$.

Šuplja staklena kugla napunjena vodom („postolarska kugla") uvećava predmete (Seneca 63. g.). Lupa je Brewsterova (1820.) debela leća, kojoj sferne plohe pripadaju istoj kugli. Imade lupa, u kojima je po više leća nablizu složeno.

Sastavljeni sitnozor (ili kraće: sitnozor) imade poput Keplerova dalekozora dvije leće sabirače, no dok je kod dalekozora veća jakost okulara, kod sitnozora je jači objektiv. Za dobrovidno se oko sitni predmet ST stavi tako blizu žarišta F objektiva (sl. 350.), da objektiv načini povećanu, realnu sliku st u prednjem žarištu s okulara. Ta je slika obrnuta. Lomom svjetlosti u okularu nastaje od slike st silno udaljena slika $S'T'$.

Ako znači f žarišnu daljinu objektiva, d udaljenost stražnjega žarišta objektiva od prednjega žarišta okulara, bit će

$$\frac{st}{ST} = \frac{d}{f}.$$

Ako je opet ω' vidni kut, u kojemu nam se ukazuje predmet u sitnozoru, φ žarišna daljina okulara, izlazi

$$st = \varphi \cdot \omega'.$$

Doda li se k tome još formula kod lupe napisana $ST = l \cdot \omega$, dobiva se iz te tri formule

$$\frac{d}{f} = \frac{\varphi \cdot \omega'}{l \cdot \omega}, \text{ dakle uvećanje } \frac{\omega'}{\omega} = \frac{d \cdot l}{f \cdot \varphi}.$$

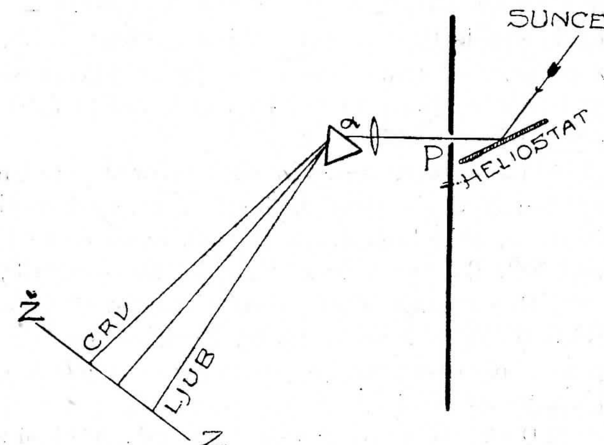
(Riječima!).

Okular je sitnozora i sam složen kao i okular Keplerova dalekozora, a sastav je objektiva još zamršeniji. I tu vrijede sada napisane formule, ali bi predaleko vodilo, da se ovdje iznese, kako se za taj slučaj mjere žarišne daljine f i φ. Predmet, što ga motrimo u sastavljenom sitnozoru, redovno je prozračan tanak sloj rasprostrt na duguljastom staklu nosiocu i pokriven stakalcem pokrivačem. Dnevna ili koja druga svjetlost odrazuje se zrcalom na predmet i krozanj prolazi u objektiv, okular i oko. Današnji sitnozori imadu između zrcala i predmeta osobit, od leća sastavljen kondenzor (Abbe 1873.). — Za najveća povećanja treba t. zv. imerzija (Amici 1840.): između stakalca pokrivača i prve leće objektiva umetne se kap tekućine; osobito je važna „homogena imerzija", gdje tekućina (cedrovo ulje) imade indeks loma kao i staklo, kojega se tiče. — Sastavljeni sitnozor

izumiše otprilike kada i dalekozor, no kako nije bio dotjeran, malo ga upotrebljavahu, te je sve do početka 19. vijeka gotovo općeno služio jednostavni sitnozor. Kao najznatniji mikroskopičari 17. vijeka vrijede Descartes, pa osobito Leeuwenhoek, onda Hooke i drugi.

Snaga sitnozora imade granice, kojih ne možemo nikakvim uvećanjem svladati; kod ispitivanja te granice ne vrijedi nam više pojam zrake svjetlosti, već treba uzeti u obzir, da je svjetlost valovit pojav. No i preko te granice mogu se sitne čestice opažati, ako se i ne može razabrati, koji im je oblik. U traku sunčane svjetlosti, što je puštamo u tamnu sobu, vidimo svjetle točkice, t. j. sitne čestice prašine, kojih kod obične rasvjete ne vidimo; kažemo, da je to rasvjeta s tamnim poljem. (I kapljice kiše vidimo bolje pred tamnijom pozadinom.) Tako i u sitnozoru čestice, kojih kod obične rasvjete ne vidimo, postaju vidljive, ako ih rasvjetlimo sa strane, tako da u oko dolazi samo svjetlost, što se ogibom (§ 304.) od čestica otklonila. Na tom se osniva ultramikroskop (Siedentopf i Zsigmondy 1903.; lat. *ultra, preko, iznad*).

293. Rasap svjetlosti. Kad gledamo kroz prizmu, vidimo predmete obojene. Najznatniji pokusi s prizmom jesu ovi:



Sl. 351.

U tamnu sobu navraćamo heliostatom (sl. 351.) kroz usku pukotinu P sunčanu svjetlost na staklenu prizmu. Brid je prizme usporedan s pukotinom, a brid i pukotina okomiti su na svežanj zraka svjetlosti. Tik ispred prizme prolazi svjetlost kroz leću sabiraču. Zrake se svjetlosti lome na prednjoj i na stražnjoj plohi prizme, pa ih hvatamo na bijelu zastoru ZZ. Na zastoru se dobiva bojadisan trak, u kojemu se boje nižu jedna do druge; taj se trak svjetlosti zove spektar (lat. *spectrum, pojava*). Najmanje je otklonjen crveni kraj spektra, najviše ljubičasti, a boje se nižu ovim redom: **crvena,** *narančasta,* **žuta, zelena,** *plava,* **modra** (indigo), **ljubičasta.** One prelaze postepeno jedna u drugu, pa zapravo imade u spektru bezbroj crvenih boja, bezbroj žutih, i t. d. — Boje su osobito istaknute, 1. ako pukotina nije preširoka, 2. ako je zastor u zgodnoj udaljenosti, 3. ako je prizma tako namještena, da je spektar (t. j. srednji njegov dio) najmanje otklonjen (minimum otklona § 278.).

Tumačenje. Svjetlost je sunčana bijela, a sastavljena je iz boja, što ih pokazuje spektar. Indeks je loma u staklu za crvenu svjetlost

manji negoli za žutu, za žutu manji negoli za zelenu i t. d. Crveni se dakle dio bijele svjetlosti na prelazu iz uzduha u staklo manje lomi negoli ljubičasti, pa se ljubičaste zrake jače otklone negoli crvene. Još se više raziđu te zrake kod prelaza iz prizme u uzduh, pa se od uskoga svežnja bijele svjetlosti dobije lepeza boja, koje načine spektar. Zadaća je leće, da načini na zastoru s l i k u pukotine *P*; ona sastojina bijele svjetlosti, koja je crvena, načini crvenu sliku pukotine, kojagod zelena svjetlost načini zelenu sliku i t. d. Prema tome je spektar niz slikâ pukotine, koje su slike jedna do druge poređane. Da je tako, možemo se uvjeriti, ako umjesto ravne pukotine uzmemo zmijoliku. Ako je otvor pukotine preširok, odviše se mnogo slika u istom mjestu spektra preklapa, pa se boje spektra miješaju i poblijede.

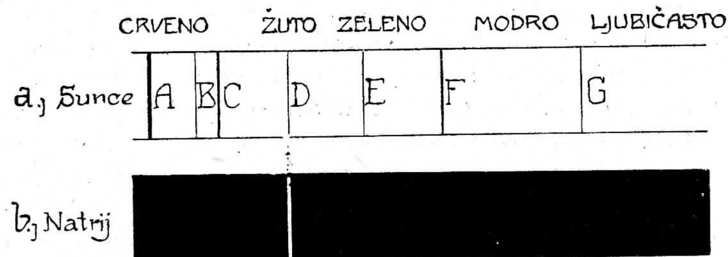
Ako se lepeza boja uhvati na konkavnom zrcalu i tim zrcalom načini na osobitoj stijeni realna slika prednje plohe prizme, slika je b i j e l a. Zrake bijele svjetlosti, što su u točki α zgodile prizmu, rastavile su se u crvenu, žutu i t. d. zraku, a sve se te zrake opet sastanu u slici točke α. B o j e, š t o n a s t a n u r a s t a v l j a n j e m b i j e l e s v j e t l o s t i, s a s t a v l j e n e d a j u o p e t b i j e l u s v j e t l o s t.

Ako je u zastoru *ZZ* uzak otvor usporedan s pukotinom *P* i to na pr. u zelenom dijelu spektra, dio će zelene svjetlosti proći kroz otvor. Pusti li se ta svjetlost kroz drugu prizmu, dobit će se lomom opet s a m o z e l e n a svjetlost. Boje se spektra ne daju dalje rastaviti, one su j e d n o s t a v n e.

Rastavljanje svjetlosti u prizmi zove se r a s a p ili d i s p e r z i j a svjetlosti (lat. *dispersus, rastepen*). Nauku o sastavu bijele svjetlosti i osnovne pokuse o raspu zahvaljujemo N e w t o n u (1672.). Ti se pokusi mogu izvesti i svjetlošću lučnice.

Otuda, što se crvena svjetlost u staklu manje lomi negoli ljubičasta, slijedi, da je u staklu brzina crvene svjetlosti veća negoli brzina ljubičaste (§ 275.). Ako neka svjetlost imade samo jedan indeks loma, zove se h o m o g e n a.

294. Fraunhoferove crte. W o l l a s t o n (1802.) i F r a u n h o f e r (1814.) opaziše, da dobro načinjen „sunčani“ spektar pokazuje mnoge i mnoge



Sl. 352.

tamne crte usporedne s bridom prizme. Kako je potonji veliku pažnju posvetio tima crtama, zovu se F r a u n h o f e r o v e c r t e. Neke crte, koje se

osobito ističu, označio je F r a u n h o f e r prvima slovima abecede onim redom, kako u spektru slijede, pa su crte A i B u crvenom dijelu spektra, crta C u narančastom, D u žutom na granici narančastoga, E u zelenom, F u plavom, G u modrom, H u ljubičastom (sl. 352.a).

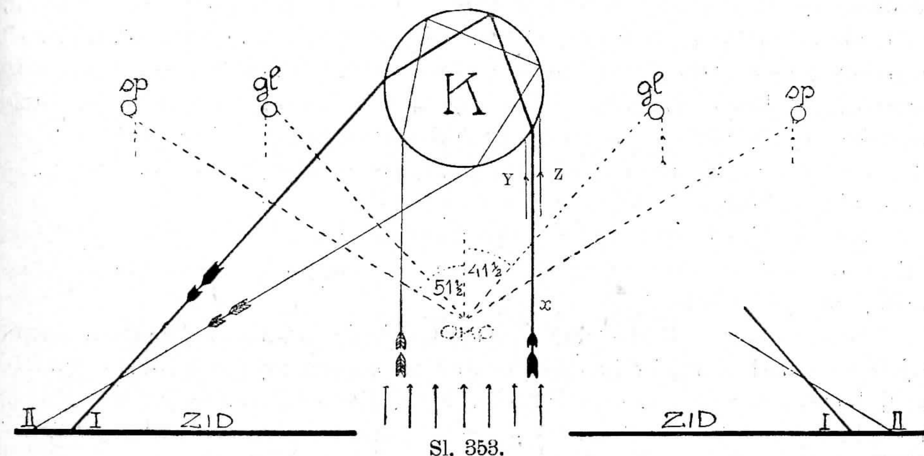
Fraunhoferove crte služe kao znakovi u spektru. Ako na pr. kažemo: „ono mjesto spektra, gdje je F-crta“, vrlo smo točno odredili mjesto u spektru. — Tamne crte spektra znače, da u svjetlosti nema onih boja, što odgovaraju tima crtama ili bar da su te boje slabijega sjaja negoli susjedni dio spektra. — Spektar obične lučne lampe nije isprekidan tamnim crtama.

Zad. **243.** Indeks je loma sumporougljika CS_2 za boju H-crte kod 0°C 1·72; kolika je brzina svjetlosti H-crte u sumporougljiku? [174000 km/sek]

Zad. **244.** Za vodu je kod 20°C indeks loma svjetlosti A-crte 1·3279, indeks loma svjetlosti H-crte 1·3427; za koliko je % jedna svjetlost u vodi brža od druge? [prva je svjetlost za 1·1% brža]

295. Duga. Duga je velik kružni luk svjetlosti na nebu, sastavljen od usporednih bojadisanih užih lukova; srednji je polumjer duge otprilike $41\frac{1}{2}^0$; pravac, što ide kroz središte luka i oko motriočevo, zgađa nebo na suprotnoj strani u Suncu; boje se duge prelijevaju iz crvenoga na izvanjoj strani u ljubičasto na unutarnjoj strani. Uz ovu „g l a v n u“ dugu često se pojavljuje „s p o r e d n a“ duga slabijega sjaja; ona je koncentrična s glavnom dugom, polumjer joj je veći (otprilike $51\frac{1}{2}^0$), a boje u njoj slijede obrnutim redom, tako da su crveni rubovi obiju duga jedan drugom susjedni. To je sve potanko opisao A r i s t o t e l; dok su njegovi predšasnici dugu dovodili u svezu s vjetrom i kišom, onda još i s odbijanjem svjetlosti, Aristotel pripisuje dugu naprosto odrazu sunčane svjetlosti s kapljica u oblaku.

Međutim na osnovu te jednostavne pomisli nije uspjelo potanje tumačiti dugu. Kako ona zapravo nastaje, uči ovaj jednostavni pokus. Kroz otvor



Sl. 353.

u bijelom zidu (sl. 353.) puštamo sunčane zrake, da sasvim obasjavaju

staklenu šuplju kuglu K napunjenu vodom. Na stijeni onda nastaju oko otvora dva bojadisana kolobara, jedan svjetliji I I s manjim polumjerom, drugi veći i tamniji II II. Budući da staklo djeluje kao planparalelna ploča (§ 279.), svjetlost se širi u kugli kao da stakla nema, te kugla predočuje veliku „kap" vode. Može se utvrditi, da unutarnji bojadisani kolobar potječe od sunčanih zraka, koje su unišle u kuglu, na unutarnjoj se strani kugle odbile i opet iz kugle izašle; zrake, što stvaraju izvanji kolobar, dvā puta su se u kugli odbile. Tim se pokusom objašnjava pojav duge, ako umjesto jedne vodene kugle pomišljamo nebrojene kapljice kišnoga oblaka. (U sl. 353. četiri malena kruga; slika pokazuje u isti mah pokus s kuglom i — na više smanjen način — postajanje duge; zrake kod duge prikazane su prekinutim crtama.) Mnoge su kapljice tako namještene, da su pravci, što spajaju kapljice s okom, usporedni sa svežnjem zraka, koje stvaraju kolobar I I. Od tih kapljica dolazi u oko svjetlost, a kako spomenuti pravci ispunjaju plašt čuna, kojemu je vrh u oku, vidimo na nebu svjetao luk, glavnu dugu „*gl*". Slično vrijedi za sporednu dugu „*sp*"; svaka je dogled-nica, što je uperena prema točki sporedne duge, usporedna s jednim svežnjem zraka, što stvaraju kolobar II II. — Da glavna duga nastaje jednostrukim, a sporedna dvostrukim odrazom sunčane svjetlosti u kapljicama vode, upoznali su arapski fizici 13. vijeka (el Širazi).

Nastaje pitanje, zašto u glavnoj dugi primjećujemo baš samo one u kapljici odbijene zrake, koje su se otklonile za kut $180^0 - 41\frac{1}{2}^0 = 138\frac{1}{2}^0$. Na to je odgovorio Descartes 1637. Označimo sa x zraku, koja stvara glavnu dugu u pokusu sa kuglom K. Susjedne usporedne sunčane zrake, koje su središtu kugle bliže (zrake y) ili od njega dalje (zrake z), otklone se za više nego li $138\frac{1}{2}^0$, te je otklon zrake x minimum, kako se može računski pokazati primjenom zakona loma. No iz svojstva minima slijedi, da u okolišu minima veoma različnim kutovima doraza (na pr. 50^0, 60^0, 70^0) pripadaju gotovo jednake vrijednosti otklona (140^0, 138^0, 141^0), tako da smjerom najmanjega otklona ide vrlo mnogo zraka, t. j. mnogo svjetlosti. Može se dakle zaključiti: od svih kapljica obasjanih Suncem idu zrake u naše oko, ali primjetljiva nam je samo svjetlost onih kapljica, za koje su zrake najmanje otklonjene i prema tome dosta jake.

Slično vrijedi za postajanje sporedne duge, a nema duge, koja bi nastala pukim odbijanjem sunčanih zraka *na* kapljicama, jer za takvo odbijanje ne postoji minimum otklona.

Da protumači boje duge, Newton[1]) je primijenio nauk o raspu svjetlosti (1704.). Indeks je loma u vodi za crvenu svjetlost B-crte 1·3310, za ljubičastu svjetlost G-crte 1·3412 (19°C). Najmanji otklon zrake, što je u kapljici 1 put odbijena, iznosi — kako potanji račun pokazuje — $137^0 40'$

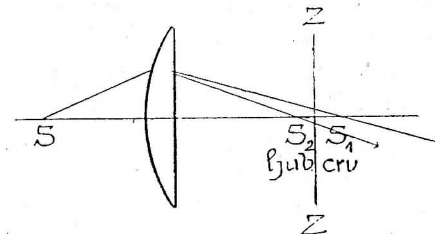
[1]) „Optics" (= „Optika") 1704.

za crvenu svjetlost, $139^0 8'$ za ljubičastu. Polumjeri duge jesu suplementi tih kutova, te je $42^0 20'$ polumjer crvenoga ruba, $40^0 52'$ polumjer ljubičastoga, što je u skladu sa činjenicom, da je crveni rub na izvanjoj strani. Dosada se uzelo kanda su sve zrake sunčane, što ulaze u kapljicu, usporedne; budući da su smjerovi tih zraka ponešto različni (u razmaku $\frac{1}{2}^0$), svakoj će boji pripadati duga široka $\frac{1}{2}^0$, tako da se duge različitih boja od česti poklapaju.

Tančine boja duge stoje i do veličine kapljica, pa se mogu objasniti samo primjenom nauke o valovima (Airy 1836.). — Svijetli prsteni, što se gdjekada vide oko Sunca i Mjeseca (s polumjerima 22^0 i 45^0 ili 90^0), zatim sporedna Sunca i sporedni Mjeseci tumače se odbijanjem svjetlosti u ledenim kristalima oblaka cirusa.

Zad. **245.** Zraka se svjetlosti u unutarnjosti kapljice vode jedamput odbila; kolik joj je otklon, ako je indeks loma 1·33333, a kut doraza $59^0\ 20'0''$ ili $59^0\ 25'0''$ ili $59^0\ 30'0''$? [$137^0\ 57'56''$]

296. Akromatična leća. Budući da se crvena i ljubičasta svjetlost ne lome jednako, slika S_1, što je načini leća od crvene svjetle točke S (sl. 354.), ne će se podudarati sa slikom S_2, što je ista leća načini od ljubičaste točke S. Između S_1 i S_2 ležale bi slike, kad bi bilo S žuto, zeleno ili modro. Ako je točka S bijela, ne možemo uhvatiti na zastoru oštre njezine slike, jer bi za svaku boju sadržanu u spektru trebalo zastor staviti na drugo mjesto. U nekim primjerima taj pojav ne smeta, pa zastor ZZ mećemo na neko srednje mjesto između S_1 i S_2; gdje bi smetao, primjenjuju se leće akromatične, t. j. onakve, koje jednako lome zrake svih boja (α, niječna čestica; χρῶμα, *boja*).



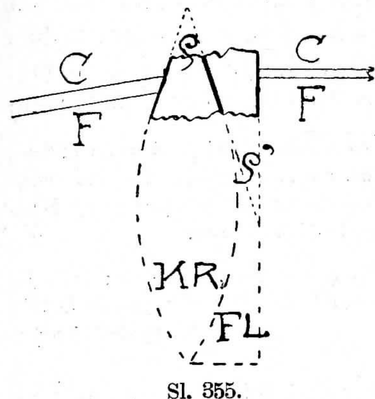
Sl. 354.

Da se dade načiniti akromatična leća, razabira se otuda, što se iz dvije zgodno odabrane vrsti stakla dade sastaviti akromatična prizma. Indeksi loma za svjetlost C-crte i za svjetlost F-crte pobilježeni su za izvjesnu vrst „krunskoga" stakla i izvjesnu vrst flintova stakla u ovoj tablici:

	C-crta	F-crta
krunsko staklo	1·52685	1·53601
flintovo staklo	1·62968	1·64826

Ako je ρ, kut prizme od krunskoga stakla, malen, bit će otklon zrake svje-

tlosti C-crte (1·52685—1) ρ = 0·52685 ρ (§ 278.). Ista će se zraka otkloniti u flintovoj prizmi s kutem ρ' za 0·62968 ρ'. Ako se obje prizme dotiču i to tako, da su im bridovi usporedni i suprotni (sl. 355.), bit će otklon svjetlosti C-crte iza loma kroz obje prizme



Sl. 355.

$$0{\cdot}52685\,\rho - 0{\cdot}62968\,\rho'.$$

Nalik tome izlazi za otklon svjetlosti F-crte

$$0{\cdot}53601\,\rho - 0{\cdot}64826\,\rho'.$$

Sada se ρ' može odabrati tako veliko, da otklon C-zrake bude jednak otklonu F-zrake. Ako je na pr. kut prizme od krunskoga stakla 10^0, treba kut ρ' flintove prizme odabrati tolik, da je

$$0{\cdot}52685 \cdot 10^0 - 0{\cdot}62968\,\rho' = 0{\cdot}53601 \cdot 10^0 - 0{\cdot}64826\,\rho',$$

pa je $\rho' = 4{\cdot}94^0$. Uz takve je kutove sastavljena prizma akromatična, t. j. ona jednako otklanja zraku svjetlosti F-crte kao i zraku svjetlosti C-crte, a približno jednako i zrake ostalih boja. Otklon je zrake u tom primjeru $0{\cdot}52685 \cdot 10^0 - 0{\cdot}62968 \cdot 4{\cdot}94^0 = 2{\cdot}16^0$. Pomislimo, da je sastavljena prizma dio sastavljene leće, kako je u sl. 355. natuknuto. Razabiramo, da sastavljajući sabiraču iz krunskog stakla s rastresačom iz flintova dobijemo leću sabiraču, koja je akromatična.

Isprva se mislilo, da rasap raste jednako s otklonom, te da otklanjajući rasap uništavamo i otklon; onda se dakako ne bi dala načiniti akromatična leća. To se pogrešno mišljenje oborilo, kad se pokazalo, kako se doista mogu praviti akromatične leće (na pr. Dollond 1757.). Otada se objektivi dalekozora sastavljaju od dvije leće, da budu akromatični. Dalekozori reflektori bili su baš poradi toga u visokoj cijeni, što je njihov objektiv (zrcalo) po prirodi svojoj akromatičan, pa su refraktori s jednostavnim objektivom davali lošije slike.

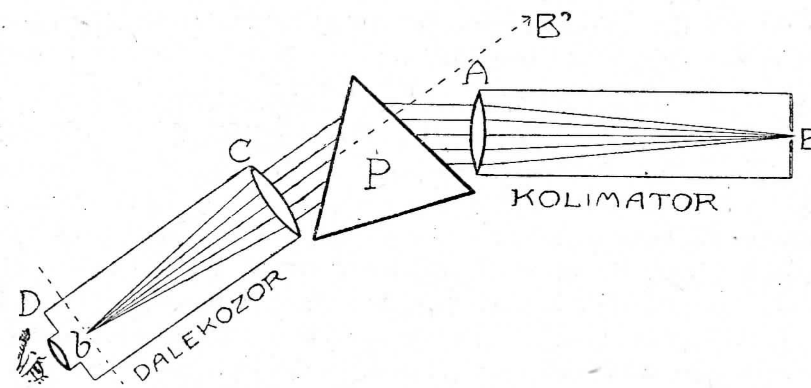
Ako su zraka svjetlosti C-crte i zraka svjetlosti F-crte jednako uklonjene, nisu s time i ostale boje spektra točno jednako otklonjene. (Bošković 1763.) Preostaje dakle još t. zv. sekundarni spektar. No našle su se vrsti stakla, iz kojih se mogu složiti prizme, koje točno jednako otklanjaju tri razne boje spektra, pa im je akromatičnost još bolja negoli kod običnih akromatičnih prizama. Objektiv sitnozora prozvan „apokromat" (grč. prijedlog ἀπό, *od*).

Ovdje se može objasniti, što je prizma „za upravno motrenje" (franc. *à vision directe*, Amici 1860.). Prizmi može se dodati prizma od druge vrsti stakla s tolikim kutom, da srednje zrake spektra izađu bez otklona; ostane onda rasap bez otklona, dok smo kod akromatične prizme imali otklon bez raspa.

Krunsko je staklo dobilo svoje ime otuda, što je nekoć kod duvanja toga stakla staklena masa prolazno poprimila oblik krune.

297. Spektralna sprava. Spektar se može dobiti i spektroskopom. Bitne su sastojine te sprave kolimator BA (sl. 356.), prizma P i dalekozor CD. Kolimator imade na bližnjem kraju leću A, na udaljenijem pukotinu B, usporednu s bridom prizme; pukotina je u žarišnoj ravnini leće. Ako se pukotina rasvjetli homogenom svjetlošću, zrake, koje idu od kojegod točke pukotine, postaju lomom u leći usporedne, udare na prizmu i ulaze usporedno u objektiv C dalekozora, tako da u žarišnoj ravnini nastaje slika b pukotine, a od te slike okular D pokazuje beskrajno udaljenu sliku B'. Ako je svjetlost sastavljena, pojedine će se boje u prizmi različito lomiti, pa će dati i različite slike pukotine; slike su poređane jedna do druge u spektar.

U spektroskopu može spektar motriti samo pojedinac („subjektivni" spektar), dok spektar dobiven načinom opisanim u § 293. mogu vidjeti mnogi najedamput („objektivni" spektar). Prednost je spektroskopa, da daje spektar i od slabijih izvora svjetlosti, a i ta, da s njime možemo laglje izvoditi mjerenja. — Spektroskop za upravno motrenje. — Ako spektroskop imade uredbu za mjerenje otklona zrake, zove se spektro-



Sl. 356.

metar. Ako se okular dalekozora spektrometra zamijeni fotografskom spravom, dobiva se spektrograf. — Dalekozorom motrio je spektre već Fraunhofer, spektralnu su spravu sastavili Kirchhoff i Bunsen (1859.). Da se dobije spektar zvijezde, može se ispred objektiva dalekozora zvjezdarnice staviti prizma ili se okular nadomjesti spektralnom spravom. — (Umjesto „kolimator" trebalo bi reći kolineator, prema lat. *collineo, skrećem u pravac*).

298. Spektri emisije. Ako spektroskop uperimo na užareno željezo, rastaljenu platinu ili na običnu lučnicu, spektar nema Fraunhoferovih crta, te se zove neprekidan ili kontinuiran.

Sasvim se drukčiji spektar dobiva, ako se uzme plamen od žeste ili još bolje plinski plamen Bunsenov (1856.), koji sam sobom slabo svjetli, pa se kojomgod tvari bojadiše. Uvede li se u Bunsenov plamen nešto kuhinjske soli, plamen požuti, a spektar plamena onda pokazuje na tamnoj pozadini žutu crtu (sl. 352. b). Ako se plamen bojadiše litijevim kloridom, spektar je sastavljen iz jedne slabo svjetle žute crte i jedne sjajne crvene crte. Spektar, što je sastavljen iz pojedinih svjetlih crta, zove se linijski spektar.

Ako se umjesto kuhinjske soli uvede u plamen koja druga natrijeva sol, spektar se ne će promijeniti, a nije zavisna vrst spektra ni o tome, kakav smo tamni plamen (Bunsenov, žestin, vodikov i t. d.) sa soli bojadisali. Odatle Bunsen i Kirchhoff zaključiše (1859.), da je dobiveni spektar značajan baš za natrij, te ga treba zvati „natrijevim"; isto je tako spomenuti spektar litijeva klorida „litijev" i t. d.; pomišljamo, da svjetle natrijevi, litijevi i t. d. atomi.

Žuta crta natrijeva spektra u nešto jačem spektroskopu prikazuje se složenom od dvije crte („dublet"). Spektar natrijeve električne svjetiljke spomenute u § 191. osim žute crte kao daleko najjače sadržaje još i crvenu, zelenu i mnogo drugih crta (sve dubleti).

Ako se u Bunsenov plamen uvedu i natrijeva i litijeva sol, spektar će biti sastavljen od spektra natrijeva i spektra litijeva. Znademo li spektre pojedinih kovina, možemo po sastavu spektra prosuditi, koje su kovine u soli, što smo je u plamen uveli. Spektar dakle služi kemijskoj analizi. Ta je „spektralna" analiza vrlo osjetljiva, jer nam može otkriti i vrlo sitne množine tvari. Bunsen i Kirchhoff vođeni spektralnom analizom otkriše elemente rubidij i cezij (1861.). Ako „tamni" Bunsenov plamen ispitujemo spektrografom velike svjetloće (prizma i leće široke!), dobivamo spektar sastavljen iz svjetlih t. zv. vrpca. Svaka je vrpca na jednoj strani, „glavi" svojoj, rek bi oštro omeđena, dok joj se sjaj na drugoj strani postepeno gubi. Ako spektralni aparat imade još i veliku rastvornu snagu, izlazi svaka vrpca kao niz mnogo crta, koje su se osobito kod glave zgusnule. To svjetljenje dolazi od molekula spojeva u Bunsenovu plamenu.

Spektar se plina dobije, ako se plin uvede u Geisslerovu cijev i onda do nekoga razrjeđenja iz cijevi ukloni; svjetlost Geisslerove cijevi daje onda spektar plina. Osobito je lijep spektar helijev, a i spektar živin. Jedan su i drugi sastavljeni od nekoliko svjetlih crta različite boje, u helijevu se spektru poglavito ističu dvije žute crte, u živinu zelena crta. Ako živinu svjetiljku (§ 191.) gledamo kroz prizmu, vidimo je mnogostruko i to redom žutu, pa onda u najjačem sjaju zelenu i t. d. — Od kovine se dobije spektar, ako puštamo električke iskre, da preskakuju između elektroda načinjenih od te kovine, ili ako se između kovnih štapova načini električki luk ili ako se ugljenu lučnice primiješa sol ispitivane kovine. — Našlo se, da spektar neke tvari zavisi o načinu, kojim se dobiva.

299. Spektri apsorpcije. Ako svjetlost, koja daje neprekidni spektar, puštamo kroz tvar, koja dio svjetlosti upija ili apsorbira, dobiva se „spektar apsorpcije"; u spektru nema onih boja, koje su apsorbirane. Spektri opisani u prećašnjem § zovu se „spektri emisije". I spektri apsorpcije mogu služiti kemijskoj analizi, jer po njima saznajemo, koja je tvar svjetlost apsorbirala.

Ako se bijela svjetlost pušta kroz „crveno" staklo u spektroskop, prevlada u spektru crveni dio, dok je preostali spektar slabe svjetloće ili taman. Crveno je staklo propustilo poglavito crvenu svjetlost, dok je ostatak svjetlosti apsorbiralo. Zgodan „filter boja" može zaustaviti sve zrake živine svjetiljke osim zelene; živina je svjetiljka s takvim filterom najjači izvor homogene svjetlosti. (Franc. *filtrer*, *procijediti*.)

Žuta je crta natrijeva spektra baš na onom mjestu spektra, gdje je Fraunhoferova D-crta u sunčanom spektru (sl. 352. a, b). Isto se tako tamne crte C i F u sunčanom spektru podudaraju s vrlo jasnim crtama vodikova spektra. To se može pokazati tako, da se sunčana svjetlost pušta u spektroskop samo kroz gornju polovicu pukotine; pred donjom je polovicom malena prizma, koja totalnom refleksijom skreće u spektroskop zrake drugoga izvora svjetlosti, koji je postrance namješten, da ne smeta sunčanim zrakama. Oko vidi sunčani spektar i spektar natrijev ili vodikov jedan nad drugim; spomenute tamne crte sunčanoga spektra leže u produženju svjetlih crta natrijeva ili vodikova spektra. — Kirchhoff je našao razlog tom podudaranju. Propuštajući kroz žestin plamen bojadisan kuhinjskom soli jaku svjetlost, koja daje neprekidan spektar, dobio je spektar, koji je poput sunčanoga pokazivao tamnu Fraunhoferovu D-crtu. Ta u prvi mah paradoksna činjenica dolazi od apsorpcije. Svaki izvor svjetlosti apsorbira onakve zrake, kakve može i sam emitirati. Natrijev dakle plamen propušta sve vrsti svjetlosti osim svjetlosti D-crte; on doduše i sam emitira tu svjetlost, ali kako je temperatura plamena razmjerno niska, emisija je slabija od apsorpcije, pa D-crta izlazi tamnija od svoga okoliša. Isto treba držati o Suncu. Od jezgre sunčane, koja je užarena i stlačena, izlazi svjetlost neprekidnoga spektra; od te svjetlosti upija hladnija atmosfera sunčana sve onakve zrake, kakve i sama emitira. Sunčani je spektar spektar apsorpcije, a Fraunhoferove nas crte uče, koji su elementi sadržani u sunčanoj atmosferi. Iz spomenutih primjera vidi se, da tamo ima i natrija i vodika.

Za velik se broj Fraunhoferovih crta sunčanoga spektra moglo utvrditi, kojima elementima pripadaju, pa su se na pr. spektralne crte željeza, kojih imade na tisuće, našle i u sunčanom spektru. — Lockyer je u spektru sunčanih protuberancija našao jaku žutu crtu dotada nepoznatu, pa je izrekao mišljenje, da joj je izvor nepoznat element „helij" (1868.); na Zemlji je helij tekar kasnije otkriven (1895.); baš najjasnija njegova crta točno se podudara sa spomenutom crtom sunčanom.

Ima crta u sunčanom spektru, koje nastaju apsorpcijom svjetlosti u zemaljskoj atmosferi. Te telurične crte (lat. *Tellus*, *Zemlja*) mijenjaju jakost prema tome, kolik je put svjetlosti u uzduhu: jače su, kad je Sunce blizu horizontu, negoli kad je visoko; jače na dnu atmosfere negoli na visokoj gori. A-crta i B-crta sunčanoga spektra nastaju apsorpcijom u kisiku našega uzduha.

Spektri planeta i mjeseca u mnogome su slični sunčanom, jer je svjetlost njihova od veće česti odbijena sunčana svjetlost. — Spektar kometa pokazuje vrpce, a sadrži u isti mah i sunčani spektar tako reći kao pozadinu slabijega sjaja. Svjetlost kometa jednim dijelom dakle potječe od Sunca; one se vrpce podudaraju s vrpcama u spektru ugljikovodika i cijana. — Spektri su stajačica vrlo raznovrsni, ali se ipak mogu poređati u jedan niz, u kojemu spektri postepeno prelaze jedan u drugi. Niz taj vodi od zvijezda s višom temperaturom površine k zvijezdama hladnijima. Danas je poznato mnogo tisuća takvih spektara, koji su razvrstani u razrede označene velikim slovima i — za tanje razlikovanje — još i brojkama 0—9. („Harvardski" sustav; po Harvard-sveučilištu, u Cambridgeu u Americi.) 99% svih zvijezda imade spektre razreda *B*, *A*, *F*, *G*, *K* ili *M*, te na pr. imadu Rigel spektar *B*8, Vega spektar *A* (točnije: *A*0), Sunce *G*, Aldebaran *K*5. Zvijezde sa spektrima *B* jesu modrikaste, sa *A* bijele, sa *F* bijelo žućkaste, sa *G* žute, sa *K* žuto crvenkaste, sa *M* crvene. U spektrima *B* ističu se apsorpcijske crte helijeve, u *A* vodikove, u *F* kalcijeve, u *G* i *K* kalcijeve još jače, u *M* vrpce titanove, osim toga je u spektrima *K* i *M* ljubičasti dio vrlo slab.

Ispitivanje je spektara nebeskih tjelesa ponajznatnija zadaća astrofizike.

300. Nauk o bojama. Newtonovoj nauci, da je bijela svjetlost sastavljena od jednostavnih boja, mnogo se prigovaralo i to zato, jer se oku bijela svjetlost nipošto ne čini složena. Dok uho razaznaje tonove sadržane u sazvuku, oko ne umije rastvoriti svjetlosti.

Ako se združi jedan dio boja sunčanog spektra, izađe kao smjesa određena, na oko jednostavna boja *B*; sve preostale boje spektra daju smjesnu boju *B'*. Pomiješa li se najposlije boja *B* i *B'*, združile su se sve boje spektra te nastane bijelo. Svjetlosti *B* i *B'*, koje zajedno daju bijelu svjetlost, zovu se komplementarne; to su na pr. crvena i modro zelena, žuta i modra svjetlost. I jednostavne boje mogu biti komplementarne; poimence spektralnim bojama počevši od crvene pa do žuto zelene redom su komplementarne boje od modro zelene do ljubičaste, dok zelenim jednostavnim bojama nije komplementarna nijedna jednostavna boja.

Dvije sastavljene svjetlosti, koje se oku pričinjaju jednake, mogu biti vrlo različita sastava. Baš poradi toga su boje površina tjelesa zamršen predmet istraživanja. Te su boje bijela, crna, siva i „šara". — Sivo se zapravo ne razlikuje od bijeloga. Ako neko tijelo od bijele svjetlosti, što na nj pada, vraća sve jednostavne sastojine jednako oslabljene, zovemo ga sivim, dok „savršeno bijela" površina vraća svu svjetlost potpunoma. Sivo je dakle bijelo slabije svjetloće, pa ako sivo tijelo obasjavamo jakom bijelom svjetlošću, može nam se pričinjati bjeljim negoli bijelo tijelo, koje je slabo rasvjetljeno (Newton).

„Savršeno crno" tijelo ne vraća ništa svjetlosti, što na nj pada, te je crno prema tome sivo svjetloće 0. Međutim oko osjeća crno kao zasebnu boju, koja je drugima bojama tako reći ravnopravna. — Boje, koje nisu ni bijelo ni crno ni sivo, zvat ćemo šarama. Takve je boje tijelo, koje jednostavne boje nejednako odbija; na pr. ako papir od bijele sunčane svjetlosti vraća poglavito crvene sastojine, dok modre upija, zovemo papir crvenim, pa je on u modrom dijelu sunčanog spektra taman.

Boje se tjelesa mogu miješati u obojenom zvrku (Alhazen, na početku 11. vijeka). To je okrugla ploča, koja ima isječke različito bojadisane; ako se ona vrti oko središta kao kotač, izgleda kao da je posvuda jedne boje. Ako se isječci bojadišu otprilike redom, kako boje slijede u spektru, moglo bi se u prvi mah očekivati, da će miješanjem izaći bijela boja; međutim to nije, već izilazi siva boja. Biva to poradi toga, što nijedan isječak ne odbija sve svjetlosti, pa prema tome i kotač kao cjelina vraća samo dio dnevne svjetlosti, što na nj pada, te nam ne može izaći bijel.

Miješanjem modre i izvjesne žute boje dobiva se bijelo (kod spektra) ili sivo (kod zvrka); tome na oko protuslovi, što slikari miješajući modro i žuto mastilo dobivaju zelenu boju. To je objasnio Helmholtz. Djelovanje slikarskih mastila ili pigmenata (lat. ***pigmentum***, ***ličilo***) jest u tom, da dnevna svjetlost kroz čestice mastila unilazi do neke dubljine ispod površine; pri tome se od česti apsorbira, a od česti odbija i lomi; svjetlost, što se nije apsorbirala, izlazi opet napolje i određuje boju mastila. Bijelo je mastilo sastavljeno od čestica, koje ne apsorbiraju nikakve svjetlosti; čestice modroga mastila propuštaju navlastito modre zrake, pa redovno još i one, koje su im u spektru susjedne, t. j. zelene i ljubičaste; u drugu ruku čestice žutoga mastila propuštaju žute zrake, pa i opet susjedne zrake t. j.

zelene i crvene. Ako je dakle neka površina pokrivena i modrim i žutim mastilom, jedino će zelena svjetlost ostati neapsorbirana, pa će nam se površina pričinjati zelena. Kod ovoga „suptraktivnoga“ miješanja boja zapravo se boje i ne miješaju već se ukidaju. Miješanje boja na zvrku zove se „aditivno“.

Papirići bojadisani različitim šarama mogu se poređati u krug boja (Newton). Oko osjeća, ako i ne poznaje spektra, da je zelena boja „bliže“ žutoj negoli narančastoj, žuta bliže narančastoj negoli crvenoj i t. d. S potpunom sigurnošću možemo šare, ako su iole žive, poređati u niz, u kojemu je svaka boja svojim susjedama „bliže“ negoli ikojoj drugoj boji. Taj niz glasi

žuta, zelena, modra, ljubičasta, *grimizna,* **crvena, žuta,**

pa kako je početak i završetak niza isti, može se taj niz povezati u krug. Pažnje je vrijedno, da u tom krugu boje slijede istim redom kao u spektru, a i to da u krugu dolazi i grimizna boja, koje u spektru nema. Grimizna boja u krugu boja baš veže one boje, što odgovaraju krajnjima bojama spektra.

U tiskarstvu opaziše (Le Blon 1710.), da se sve boje mogu dobiti miješanjem triju boja (na pr. žuto, crveno, modro; „osnovne“ slikarske boje), pa se na tom osniva trobojni tisak, pri čemu se boje miješaju suptraktivno. Ima i način fotografiranja u bojama, koji se osniva na suptraktivnom miješanju triju osnovnih boja, dok se kod Lumièreove autokromfotografije (1904.) tri osnovne boje miješaju aditivno.

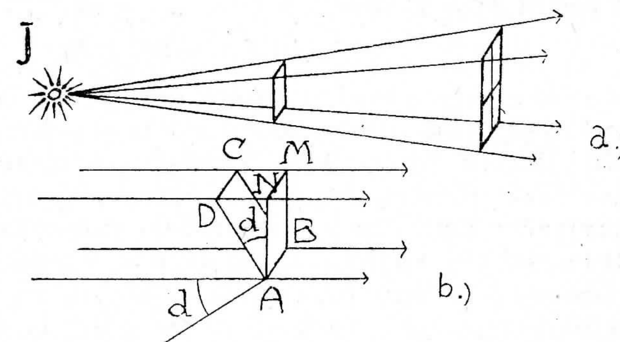
Ako u prostor gotovo sasvim taman stavimo crvenu plohu i do nje modru, crvene ne ćemo vidjeti, dok će se modra ukazati slabo svjetla i neodređene boje. Kad onda pustimo svjetlost u sobu, crvena nam se ploha čini sjajnija od modre. Prema tome ako se sjaj crvene i modre plohe jednako povećaju, pričinja nam se, da je sjaj crvene plohe jače narastao. (Purkyně 1825.) Tumači se to time, što u tmini gledamo štapićima (§ 283.), a ti da ne razlikuju boja i slijepi su za crvenu boju. — Potpuni nevid boja, djelomični nevid boja.

Nacrtajmo na bijelom papiru sliku crvenim mastilom i gledajmo sliku kroz „crveno“ staklo, koje propušta sve boje sadržane u crvenilu mastila, a ne propušta ostalih spektralnih boja. Od bijelih mjesta na papiru prolaze kroz naše staklo samo boje, koje zajedno daju crveno, pa ne ćemo moći razlikovati bijeli dio papira od bojadisanoga; ne ćemo dakle vidjeti slike. Baš protivno nastaje, ako istu crvenu sliku gledamo kroz „modro zeleno“ staklo, koje propušta samo boje, što nisu sadržane u svjetlosti mastila. Budući da od crvenih mjesta papira izlazi samo takva svjetlost, koje zeleno staklo ne propušta, izaći će nam ta mjesta tamna, dok ćemo bijeli dio papira vidjeti zelen; slika se dakle vidi tamna na zelenoj pozadini. Na tim se činjenicama osniva motrenje stereoskopskih slika, koje zovu anaglifi (ἀναγλυφή, *niski reljef*). Kod njih je ona slika predmeta, koja je određena za desno oko, izvedena crveno, dok je slika za lijevo oko komplementarno modro zelena. Obje su slike otisnute na istom mjestu, te se prodiru (ali ne poklapaju, budući da su različite). Ako taj anaglif motrimo u valjanom namještaju kroz takve naočare, da je pred

desnim okom zeleno staklo, pred lijevim crveno, svako oko vidi samo onu sliku, koja je za nj određena, te nastaje stereoskopski učinak. (d'Almeida 1858.) *Projicirani* anaglif može motriti najedamput mnogo gledalaca. — Amo ide i prikazivanje „letećih sjena“ u zabavištima (1923.).

301. Fotometrija. Nauka o mjerenju svjetlosti zove se fotometrija, sprave za mjerenje svjetlosti fotometri. Ponajznatnija je zadaća fotometrije, da uči ispoređivati „jakosti“ izvora svjetlosti. Oko ne može neposredno ocijeniti, koliko puta neka svjetla točka jače svjetli negoli druga, ali može da odredi za dvije svjetle površine, koje se dotiču, je li im sjaj jednak ili nije. Ako nam se dva susjedna dijela površine, koja difuzno odbija tuđu svjetlost, pričinjaju jednako svjetla, kažemo, da su ti dijelovi jednako rasvjetljeni.

Rasvjeta neke površine u teoriji znači množinu (energiju) svjetlosti, što u 1 sek udari na 1 m^2. Rasvjeta stoji do toga, koliko je jak izvor svjetlosti i kako je namješten prema rasvjetljenoj površini. Ako se izvor svjetlosti nadomjesti izvorom dvostruke jakosti, bit će rasvjeta dvostruka; to će biti na pr. onda, ako površinu umjesto jednom žaruljom rasvjetlimo dvjema, koje su sasvim jednake onoj prvoj, a jedna su tik druge. Rasvjeta je razmjerna s jakošću izvora svjetlosti. — Ako rasvjetljenu površinu usporedno odmaknemo od izvora svjetlosti J (sl. 357. a) u dvostruku daljinu, čun svjetlosti, koji je prije udarao na 1 cm^2, zgađat će sada $2^2 = 4$ cm^2, te će svaki cm^2 sada primati samo $1/4$ svjetlosti. Rasvjeta je obrnuto razmjerna s kvadratom udaljenosti izvora svjetlosti. — Ako je površina okomita na svežanj svjetlosti, rasvjeta je

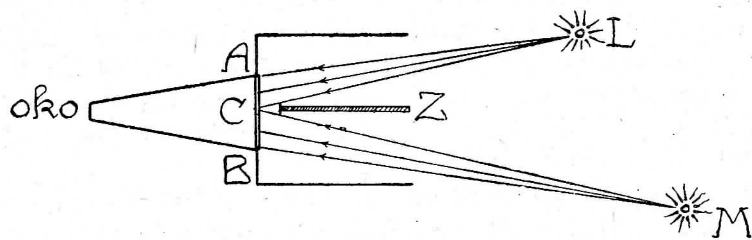


Sl. 357.

najveća, jer u tom namještaju površina hvata najviše svjetlosti. Pramen svjetlosti, što pada na *ABCD* (sl. 357. b) pod kutom doraza *d*, kod okomitog bi upadanja zgađao površinu *ABMN*, koja je u omjeru *cos d* manja. Koliko je puta ona prva površina veća, toliko puta manje svjetlosti prima na svaki cm^2, te je dakle priklonjena površina u omjeru *cos d* slabije rasvjetljena nego li okomita površina.

Ti su zakoni osnov fotometrije. Vrlo je jednostavan fotometar Bouguerov (najstariji fotometar, 1729.). Ploču *AB* od mutnoga stakla (sl. 358.)

obasjavamo sa stražnje strane izvorima svjetlosti L i M, koje želimo isporediti. Iza ploče je zaslon Z, koji čini, te na polovicu, AC, ploče pada samo svjetlost od L, na drugu polovicu, BC, samo svjetlost od M, oboje pod jednakim kutovima doraza. Jači izvor svjetlosti odmičemo, dok nam se AC i BC ne čine jednako svjetli; onda su rasvjete na tim plohama jednake. Neka je i jakost izvora L, j jakost izvora M, R rasvjeta plohe AC, S



Sl. 358.

rasvjeta plohe BC, LC udaljenost izvora L od granice C obadvaju svjetlih polja, MC udaljenost izvora M od C. Onda je prema gornjim zakonima

$$R : S = \frac{i}{LC^2} : \frac{j}{MC^2},$$

a budući da je $R = S$, izlazi

$$j : i = (MC : LC)^2.$$

Ako je izvor svjetlosti u tančine određen, te se možemo uzdati, da mu je sjaj stalan, može nam služiti za određivanje jedinice jakosti. Kao jedinica jakosti izvora ponajviše se upotrebljava međunarodna „svijeća" (francusko-englesko-amerikanska jedinica 1909.) i Hefnerova „svijeća" (njemačka jedinica 1883.). 1 Hefnerova svijeća jest jakost, kojom Hefnerova svjetiljka propisno goreći sja u horizontalnom smjeru. 1 *Hefnerova svijeća* = 0·90 *međunarodne svijeće*. Međunarodni odbor za uteze i mjere zaključio je g. 1937., da se ima uvesti nova jedinica jakosti izvora svjetlosti: nova svijeća. Tako se zove 1/60 jakosti izvora, kojom sja ploha 1 cm² t. zv. crnog tijela (v. § 312.) u smjeru okomitom na tu plohu, kad crno tijelo ima temperaturu, kod koje se platina skrućuje (1774 °C). 1 *nova svijeća* = 1·09 Hefn. sv. = 0·98 međunar. sv.

Jedinica se rasvjete zove luks (lat. *lux, svjetlost*). Ako na površinu tijela pada okomitim smjerom svjetlost od izvora, kojemu je jakost 1 svijeća, a udaljen je 1 m, rasvjeta je 1 luks. Prema tomu ako je jakost izvora 50 svijeća, a udaljenost 5 m, rasvjeta je poradi veće jakosti izvora 50 puta veća od 1 luksa, a poradi veće daljine samo $1 : 5^2 = 1 : 25$, dakle je rasvjeta $50 : 25 = 2$ luksa. — Međunarodni luks, Hefnerov luks, novi luks.

Prema tome izboru jedinica izvor svjetlosti I svijeća izvodi na mjestu površine udaljenom r m, ako je kut doraza d, rasvjetu

$$R = \frac{I \cos d}{r^2} \text{ luks.}$$

Ako izvor svjetlosti, koji sja na sve strane s jakošću 1 svijeće, pomišljamo u središtu kugle s polumjerom 1 m, kažemo, da kroz 1 m² površine kugle prolazi „tok svjetlosti" 1 lumen (lat. *svjetlost*), dakle kroz cijelu površinu 4π lumena. I kroz kojugod drugu plohu, koja sasvim okružuje izvor, teče onda 4π lumena. Izvor jakosti I svijeća izašilje $4\pi I$ lumena. — Da na površini P m² bude rasvjeta R luksa, treba tok svjetlosti $P \times R$ lumena. — Pojam je toka svjetlosti znatan poglavito u primjerima, kada je izvor zamršen i nedostižan, te na pr. govorimo o toku dnevne svjetlosti, što ide kroz prozor u sobu.

Rasvjeta nije isto što i svjetloća površine. Ako lećom načinimo sliku Sunca na bijelu papiru, ne možemo je gledati zbog silne svjetloće; na počađenom je papiru motrimo bez boli; u oba je primjera rasvjeta papira ista, ali su svjetloće što od te rasvjete nastaju, različite.

Ako kroz cijev motrimo svjetlu površinu, koja je tako široka, da samo nju vidimo, sjaj se vidnoga polja ne mijenja gledamo li izbliza ili izdaleka. Koliko se kod udaljivanja djelovanje svakoga cm² površine umanji, toliko naraste dio površine, koji vidimo. — Ploha, koja svjetli svojom svjetlošću ili odrazuje tuđu, sja u različitim smjerovima različitom jakošću. Na pr. površina zrcala, koje je svijećom obasjavano, sja samo u smjerovima, što slijede iz zakona odbijanja; u drugu ruku bijeli papir, koji difuzno odbija svjetlost, sja najjače u smjeru okomitom. Tu vrijedi Lambertov zakon emisije (1760.), koji se može ovako izreći: ako kroz cijev motrimo svjetlu plohu jedamput okomitim smjerom a drugi put koso, pričinja nam se jednako svjetla; koliko puta više cm² vidimo koso gledajući negoli kod okomitoga motrenja, toliko puta cm² u kosom smjeru slabije sja negoli u okomitom. — Oba se ta zakona primjenjuju kod fotometara, koji služe mjerenju rasvjete.

Rasvjeta neka je kod čitanja na pr. 50 luksa i neka ne bude manja od 10 luksa. — Kad je Sunce u zenitu, izvodi na horizontalnom tlu rasvjetu od kojih 100000 luksa, puni Mjesec ¼ luksa.

Često se pita, kolika je plošna svjetloća nekoga izvora. Dobivamo je, ako jakost, kojom komad površine sja u smjeru okomitom, podijelimo s veličinom toga komada. Prevelika plošna svjetloća smeta oku. — Plošna je svjetloća pozitivnoga kratera lučnice 16000 svijeća/cm², ako je jakost struje 10 ampera. Bijel papir izložen podnevnom Suncu imade plošnu svjetloću 2—3 svijeće/cm², izložen nebeskom modrilu na pr. 0·04 svijeće/cm².

Osobite su teškoće kod ispoređivanja svjetlosti različitih boja; kad gledamo dvije površine, koje različitim bojama jednako svjetle, kolebamo se u sudu i ne umijemo pouzdano reći, jeli sjaj jednak ili nije.

Zad. **246.** Koliko svijeća treba da imade žarulja, da iz udaljenosti od 5 m izvodi na svjetloj površini okomitoj na zrakama svjetlosti rasvjetu 50 luksa? [1250 svijeća]

Zad. **247.** Sunce obasjava plohu okomitu na sunčane zrake na granici atmosfere zemaljske rasvjetom 200000 luksa; koliko svijeća ima izvor svjetlosti, što ga zovemo Suncem, ako je taj izvor udaljen 150 miljuna km? [$4{\cdot}5 \cdot 10^{27}$ svijeća]

Zad. 248. Iz rezultata prеđašnjega zadatka i polumjera sunčanoga $7 \cdot 10^5$ km neka se izračuna, kolika bi bila srednja plošna svjetloća Sunca, da je ono ploča. [300000 svijeća/cm²]

Zad. 249. Koliko rasvjetljuje horizontalnu knjigu svjetiljka od 1000 svijeća, koja je od knjige u horizontalnom smjeru udaljena za 3 m, u vertikalnom za 4 m? (stijene sobe neka su crne; zašto?) [32 luks]

Zad. 250. Izvor svjetlosti sja u svima smjerovima jednako; kolika je jakost toga izvora, ako iz njega izlazi tok 1 dekalumen?

Zad. 251. Od izvora svjetlosti s jakošću 2000 svijeća neka pada svjetlost kroz otvoren prozor u sobu i to okomito na ravninu prozora; koliko svjetlosti teče kroz prozor, ako je izvor od prozora udaljen 10 m, a prozor je velik 2 m²? koliko bi svijeća morao imati u sobi izvor svjetlosti, koji će sobu rasvjetljivati isto tolikim tokom svjetlosti? [40 lumena; 3·2 svijeće]

Zad. 252. Kolik tok svjetlosti treba, da se crtaća daska sa stranicama 60 cm i 40 cm rasvjetli sa 50 luksa? [12 lumena]

F o t o m e t r i j a z v i j e z d a. Ako se ravna ploha stavi okomito na zrake svjetlosti, što dolaze od zvijezde, svjetlost zvijezde izvodi izvjesnu rasvjetu; tu rasvjetu zovemo (prividnim) s j a j e m zvijezde. Prema sjaju svrstavamo zvijezde u r e d o v e; zvijezda je 1. reda toliko puta sjajnija od zvijezde 2. reda, koliko je puta zvijezda 2. reda sjajnija od zvijezde 3. reda ili zvijezda 3. reda od zvijezde 4. reda i t. d. Prema tome od reda do reda sjaj zvijezde pada geometrijskom progresijom. Ljestvica je zvijezda tako odabrana, da zvijezde 1. reda sjaju baš 100 puta jače nego li zvijezde 6. reda, dakle $\sqrt[5]{100} = 2{\cdot}512$ puta jače negoli zvijezde 2. reda. Zvijezda 6. reda još se vidi prostim okom, dok zvijezdu 7. reda opažamo dalekozorom.

Neprilično je pri toj razdiobi, da nekoliko zvijezda pripada redovima, koji su označeni negativnim brojevima. Poimence zvijezda, koja je 2·512 puta sjajnija od zvijezde 1. reda, pripada 0-tom redu; a zvijezda od nje 2·512 puta sjajnija redu —1.

Zad. 253. Sirij pripada redu —1·6; koliko je puta njegova svjetlost jača od svjetlosti Sirijeva Pratioca, ako taj pripada redu 8·4? [10000 puta]

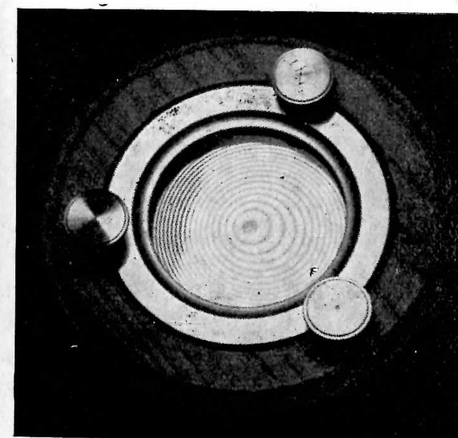
Zad. 254. Sirij pripada redu —1·6, Vega redu 0·1, a Vega je 4 puta udaljenija negoli Sirij; koliko je puta jakost svjetlosti jedne zvijezde veća od druge? [Jakost je svjetlosti Vegine 3·4 puta veća od Sirijeve]

4. Fizikalna optika

302. Interferencija svjetlosti. U fizikalnu optiku zasijecaju sve one česti optike, koje nisu sadržane u geometrijskoj optici. Dok je osnovni pojam geometrijske optike zraka svjetlosti, fizikalna se optika poglavito oslanja na pojam v a l a s v j e t l o s t i. Budući da ona pored ostaloga razlaže i to, kako osnovni zakoni geometrijske optike slijede iz nauke o valovima, obuhvata ona zapravo i geometrijsku optiku.

Da je svjetlost pojav valova, pokazuju u prvom redu interferencija i difrakcija svjetlosti. Među pojavima interferencije prvi je potanko ispitan pojav k o l o b a r a kod „N e w t o n o v i h s t a k a l a". Plankonveksna leća *PP* (sl. 359.) neka se dotiče svojom konveksnom stranom planparalelne staklene ploče *RR*. Polumjer krivosti konveksne plohe neka je vrlo velik (na pr. 20 m), te se ta ploha jedva razlikuje od ravnine. Rasvjetlimo ta stakla homogenom svjetlošću na pr. Bunsenovim plamenom *B*, koji je bojadisan natrijem; zrake svjetlosti neka dolaze smjerom otprilike okomitim na površinu stakla, a oko neka je tako namješteno, da motri stakla iz istoga smjera, iz kojega svjetlost dolazi. Da plamen i oko jedno drugome ne smetaju, treba staviti između oka i stakla priklonjenu staklenu ploču *SS*, koja odbija ali i propušta svjetlost; ta ploča poput zrcala odbija zrake, što dolaze od *B*, prema staklima; u drugu ruku svjetlost, što se od tih stakala vraća, ide kroz *SS* u oko. Uz ovaj raspored pokusa oko vidi u dotačištu stakla *PP* i *RR* crnu mrlju, koju okružuju koncentrični svijetli i tamni kolobari, koji su prema rubu stakla sve više stisnuti (sl. 360.). Prelaz je svjetlosti u tminu postepen, a polumjer svakog kolobara mjerimo od središta mrlje do najsvjetlijeg ili najtamnijeg mjesta u kolobaru.

Sl. 359.



Sl. 360.

Kolobari slijede po jednostavnom geometrijskom zakonu. Između *PP* i *RR* nalazi se sloj uzduha, a debljine toga sloja na mjestima, gdje vidimo svjetle kolobare, stoje u omjerima l i h i h brojeva (1 : 3 : 5 : 7 : . . .); dok debljine na mjestima, gdje

su tamni kolobari, slijede u omjerima takih brojeva (2 : 4 : 6 : 8 : . . .). Te se debljine — kako su sitne — ne mogu doduše neposredno mjeriti, ali se mogu izmjeriti promjeri kolobara, a debljine su slojeva razmjerne kvadratima tih promjera (približno; zašto?).

Pojavi kolobara jednostavno se tumače, ako pomišljamo, da se svjetlost širi valovima. Valovi svjetlosti, koji su se odbili na prednjoj granici sloja uzduha, u točki *a*, interferiraju (§ 250.) sa svjetlošću, što se odbila na stražnjoj granici u točki *b*. Potonja je svjetlost prevalila put, koji je za $ab + ba = 2\,ba$ duži, pa ona poradi toga zakasni. Do dužine *ab* stoji, hoće li se kod interferencije brijeg jednoga niza valova sastati sa brijegom drugoga niza ili s dolom; hoće li se dakle jedna svjetlost drugom pojačati ili uništiti. Treba međutim pripaziti i na to, da se u točkama *a* i *b* svjetlost ne odbija jednako; u točki se *a* svjetlost odbija udarivši na optički rjeđe sredstvo, dok se u točki *b* odbija na gušćem sredstvu, pa ako se u prvom slučaju brijeg odbija kao brijeg, u drugom se brijeg odbijanjem pretvori u dol (isp. što se reklo u početku § 247.). Gdje se stakla dotiču, razmak je $ab = 0$, tako da se brijegovi valova odbijenih na prednjoj granici sloja uzduha sastaju s dolovima valova odbijenih na stražnjoj granici, pa se jedni drugima unište: dotačište mora dakle da je tamno. (To uostalom izlazi i otuda, što u dotačištu staklo *PP* kao da bez prekida prelazi u staklo *RR*, pa tamo nema nikakve refleksije.) U dotačištu je dakle pojav isti, kakav bi bio da je jedna odbijena svjetlost za drugom zaostala za $^1/_2\,\lambda$ (λ dužina vala).

Gdje je debljina sloja uzduha *ab*, interferiraju nizovi valova, koji su zaostali jedan za drugim za

$$\delta = {}^1/_2\,\lambda + 2\,ab.$$

Prema tome ako je $ab = \frac{1}{4}\lambda, \frac{3}{4}\lambda, \frac{5}{4}\lambda, \frac{7}{4}\lambda, \ldots,$

bit će $\delta = \lambda, 2\,\lambda, 3\,\lambda, 4\,\lambda, \ldots,$

pa će se valovi interferencijom pojačavati (1., 2., 3., 4., . . . svijetli kolobar).

Gdje je $ab = \frac{2}{4}\lambda, \frac{4}{4}\lambda, \frac{6}{4}\lambda, \frac{8}{4}\lambda, \ldots,$

bit će $\delta = {}^3/_2\lambda, {}^5/_2\lambda, {}^7/_2\lambda, {}^9/_2\lambda, \ldots,$

pa se valovi interferencijom unište (1., 2., 3., 4., . . . tamni kolobar).

Ako je polumjer krivosti konveksne plohe leće = 20 m = 20000 mm, a služimo se žutom svjetlošću natrijevom, imat će na pr. 5. svjetli kolobar polumjer 7 3 mm. Taj kolobar nastaje, gdje je debljina sloja $ab = 0{\cdot}00133$ mm (što se izračunava iz jednadžbe $2 \cdot 20000 \cdot ab = 7{\cdot}3^2$; zašto?). No kako za 5. svjetli kolobar vrijedi $^9/_4\,\lambda = 0{\cdot}00133$, dobiva se $\lambda = \mathbf{0{\cdot}00059}$ mm. Tolika je dakle u uzduhu dužina vala natrijeve svjetlosti. Frekvencija *n* te svjetlosti izračunava se iz formule $\lambda = c : n$ (§ 245.). Budući da je brzina

svjetlosti u uzduhu $c = 3 \cdot 10^{11}$ mm/sek, izlazi $n = 3 \cdot 10^{11} : 0{\cdot}00059 = 5{\cdot}1 \cdot 10^{14}$ u sek (510 biljuna titraja u sekundi).

Bacimo li na Newtonova stakla crveni dio spektra, kolobari su širi negoli kod žute svjetlosti, jer je dužina vala veća, sve do najviše

$$0{\cdot}0008 \text{ mm} = 0{\cdot}8\ \mu = 800\ \text{m}\mu = 8000\ \text{å};$$

u ljubičastoj su svjetlosti kolobari uži, dakle je dužina vala ljubičaste svjetlosti manja, sve do

$$0{\cdot}0004 \text{ mm} = 0{\cdot}4\ \mu = 400\ \text{m}\mu = 4000\ \text{å}$$

(å, Ångströmova jedinica, § 2.). Budući da je dužina vala ljubičaste svjetlosti na kraju spektra $^1/_2$ dužine vala crvene svjetlosti na drugom kraju, pripada prvoj svjetlosti 2 puta toliko titraja koliko drugoj, pa je — u jeziku akustike — krajnja ljubičasta svjetlost „za oktavu viša" od krajnje crvene svjetlosti.

Ako se Newtonova stakla rasvjetle **bijelom** svjetlošću, dotačište će stakala izgledati i opet crno, jer to vrijedi za svaku homogenu boju, što je u bijeloj boji sadržana. Na drugim će se mjestima različite jednostavne boje interferencijom različito oslabljivati, pa će miješanjem njihovim nastati šarene boje, te će crna mrlja biti okružena raznobojnim kolobarima.

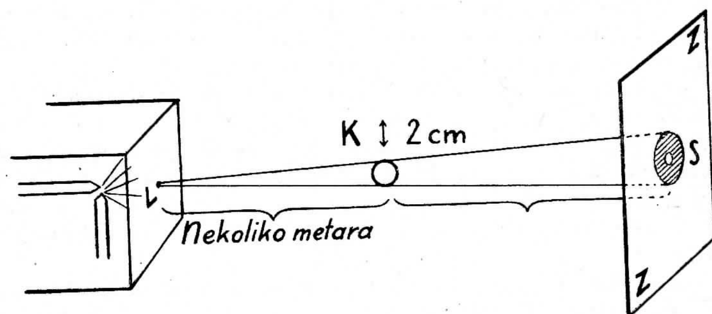
Ako nema ploče *SS*, treba motriti **kosim** smjerom; onda kolobari nisu krugovi. — Slične pojave kao kod Newtonovih stakala vidimo kod mjehura od sapunice i drugih tankih slojeva tekućine (na pr. terpentinsko ulje na vodi).

Da svjetlost sa svjetlošću može dati tminu, upoznao je **Grimaldi** (umro 1663.) **Hooke** je našao (1664.), da boja tankoga sloja stoji do njegove debljine i dosjetio se, pokusu sa dva stakla, što ga ovdje opisasmo. **Newton** je pokuse sa staklima u tančine proveo i opisao (1675.), pa im otuda i ime „Newtonova stakla". Da protumači činjenice **Newton** uvodi pomoćnu hipotezu, da „**čestice svjetlosti**" na svom putu periodski mijenjaju „sklonost na lako odbijanje i lomljenje" (1704.); današnje tumačenje potječe od **Younga** (1804.).

Svjetlost, što se odbija na stražnjoj granici sloja uzduha, ponešto je slabija od svjetlosti odbijene na prednjoj granici. Ipak se interferencijom na najtamnijim mjestima svjetlost **sasvim** uništi, a tome je razlog, što u interferenciji sudjeluje i svjetlost, koja je poradi višestruke refleksije prevalila put *ab* 4 puta ili 6 puta ili 8 puta i t. d. — Moglo bi se pitati, zašto ne bi dostajala samo plankoveksna leća *PP*, da se načine kolobari interferencijom svjetlosti odbijene na prednjoj strani leće (na pr. u točki α) i one, što se odbija na stražnjoj strani (u točki β). No kad motrimo kolobare, akomodiramo oko na tanki sloj na pr. na točku *a*; svjetlosti, što iz *a* ide u oko, pridružuje se svjetlost, što dolazi od *b*, i te svjetlosti potječu od **istoga** sitnoga dijela plamena. Kad uzmemo leću *PP* samu za se i oko akomodiramo na točku α prednje njezine strane, ulazit će u oko zrake, što su se odbile kod α; njima se pridružuju još i onakve zrake, što idu kroz α, a odbile su se na stražnjoj strani leće u β i u točkama, koje su od β podosta razmaknute; potonje zrake potječu od **različitih** dijelova plamena, pa su im faze titranja različite i učinci se njihovi pobrkaju.

Kada zrcalom ili lećom načinimo realnu sliku svjetle točke, svjetlost treba — kako se dade pokazati — na svakoj zraci **jednako** vrijeme, dok dođe od svjetle točke do slike, pa svjetlosti, što su došle duž različitih zraka, stignu u sliku s jednakim fazama, te se međusobno pojačavaju.

303. Ogib svjetlosti. Ako svjetlost, koja dolazi od svjetle točke, prolazi uz rub neprozirne ploče, sjena ploče nije sasvim u skladu sa zakonima pravocrtnoga širenja. Uz rub t. zv. geometrijske sjene izmjenjuju se svjetlost i tmina, te ima svjetlosti u samoj geometrijskoj sjeni, a tmine i izvan te sjene. Pojave te ruke opisao je Grimaldi, te ih prozvao difrakcija (lat. *diffractus, razbit*). Pojavi difrakcije ili ogiba navedoše Grimaldia na pomisao, da je svjetlost pojav valova, pa kako valovi vode obilaze hrid, što iz mora strši, tako i valovi svjetlosti mogu mimoići zapreke. Potanko je ogib tumačio Fresnel (1815. i dalje) načinom, koji ćemo pobliže objasniti na primjeru optičke „mrežice". Poisson mišljaše (1823.), da Fresnelova teorija ne valja, pa je iz nje izveo neki rezultat, koji mu se činjaše apsurdan. Međutim pokus je pokazao, da je taj rezultat doista u skladu s činjenicama. Pokus zamišljen od Poissona je ovaj: Ako od svjetle točke L (sl. 361.) svjetlost pada na neprozirnu kuglu K i onda na zastor ZZ, središte je kugline sjene S svjetlo. (Kugla ima promjer na pr. 2 cm, a udaljena je i od izvora svjetlosti i od zastora nekoliko metara. L je

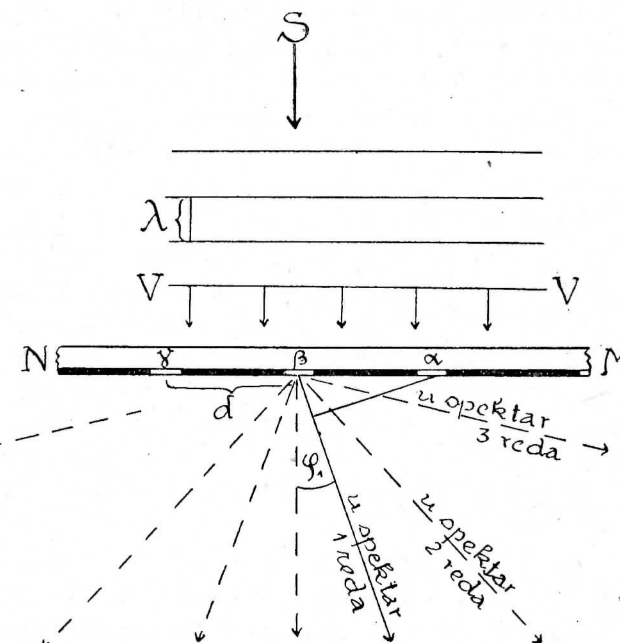


Sl. 361.

sitan otvor ispred lučnice zatvorene u sanduku, soba treba da je potamnjena, a zastor je prozračan, te na nj gledamo sa stražnje strane, da glava ne smeta zrakama svjetlosti.) U opreci sa zakonom pravocrtnoga širenja svjetlost je u tom primjeru kuglu obišla.

Za znanstvenu je praksu osobito znatan ogib kod t. zv. optičke mrežice. Mrežica služi poput prizme **dobivanju spektra,** a mjerenja izvedena kod mrežice lako vode na dužinu vala svjetlosti. Prve mrežice, što ih je pravio i u spomenute svrhe upotrebljavao Fraunhofer (1823.), bile su skup tankih usporednih žica poređanih u istoj ravnini u jednakim razmacima, ili opet staklena ploča, na kojoj su dijamantom urezani u jednakim sitnim razmacima usporedni pravci (gdje je potez, staklo nije prozirno).

Razmak sredina susjednih poteza zove se konstanta mrežice, pa je na pr. kod mrežice koja na širinu 1 engleskog palca (= 25·4 mm) imade 15 000 crta (Rowland), konstanta mrežice $d = 25{\cdot}4 : 15000 = 0{\cdot}0017$ mm.



Sl. 362.

Neka na mrežicu MN (sl. 362.) padaju ravni valovi VV homogene svjetlosti, kojoj je dužina vala λ; ravnine vala neka su usporedne s ravninom mrežice. Takvi se valovi dobivaju, ako je svjetla točka S vrlo daleko (ili ako se S stavi u žarište leće sabirače). Prozirne pruge $\alpha, \beta, \gamma, \ldots$ neka su okomite na ravninu crtnje. Svaka je točka u tim prugama ishodište elementarnih valova. Koliko će svjetlosti nastati interferencijom tih valova, stoji do smjera, iz kojega gledamo prema mrežici. Neka je smjer gledanja okomit na crte mrežice i neka čini s okomicom mrežice kut φ. Ako je $\varphi = 0$, elementarni valovi od svih točaka mrežice trebaju približno jednako vrijeme do oka (akomodiranog na beskrajnu daljinu), pa istodobno stignu na retinu oka, te se pojačavaju. Ako je put od pruge β do oka baš za λ veći nego li put od pruge α do oka, elementarni će valovi, što dolaze od točaka β, zaostati za dužinu λ iza elementarnih valova, što izlaze iz točaka α, dakle se i sada valovi na retini pojačavaju. (Isto onda vrijedi za valove iz γ i ostalih pruga.) Kut φ_1, za koji to vrijedi, izračunava se iz jednadžbe (v. slika 362.)

$$\lambda = d \sin \varphi_1.$$

U smjeru φ_2 neka valovi, koji izlaze iz točaka β, zaostanu za valovima iz α za 2 dužine vala; oni se dakle i opet interferencijom pojačavaju; smjer se φ_2 izračunava iz

$$2\lambda = d \sin \varphi_2$$

i t. d. Pri tom možemo oko sasvim približiti mrežici, pa izlazi, da oko kroz mrežicu vidi točku S mnogostruko: u smjeru okomice ($\varphi = 0$) i u smjerovima, koji s okomicom čine kutove φ_1, φ_2 i t. d. bilo na jednoj

bilo na drugoj strani okomice. Potanje teoretsko ispitivanje uči, da u drugim smjerovima ne vidimo svjetlosti. (Kad bi umjesto m n o g i h prozirnih pruga uzeli samo n e k o l i k o njih, svjetlost bi se i tmina p o s t e p e n o izmjenjivale.)

Uzme li se umjesto svjetle t o č k e *S* svjetla p r u g a usporedna s prugama mrežice, vidimo kroz mrežicu i tu prugu mnogostruko.

Kutovi φ_1, φ_2, .. zavise o dužini vala λ. Ako dakle svjetlost n i j e homogena, dobivaju se različite vrijednosti φ_1 i prema tome n i z svjetlih točaka iii crtâ, koje onda čine s p e k t a r. Taj se spektar zove s p e k t a r 1. r e d a. Prema formuli $\sin \varphi_1 = \lambda : d$ imat će otklon φ_1 najmanju vrijednost za svjetlost najmanje dužine vala, dakle je ljubičasti kraj spektra dobivenoga mrežicom manje otklonjen nego li crveni kraj. Vrijednostima φ_2 pripada spektar 2. reda, koji započinje s većim otklonom negoli spektar 1. reda, s p e k t a r 2. r e d a, koji započinje s većim otklonom negoli spektar 1. reda, pa je i više razvučen. I t. d. Spektri se različitih redova od česti preklapaju. Svi ti spektri dolaze d v o s t r u k o, po jedan na svakoj strani svjetle točke (ili pravca), što je vidimo gledajući smjerom okomitim na mrežicu („spektar 0-tog reda").

Iz formule $\sin \varphi_1 = \lambda : d$ slijedi, da je otklon to veći, što je manja konstanta mrežice d; onda je i širina spektra veća. — Umjesto da motrimo p r o s t i m okom, možemo na mrežicu uperiti dalekozor, a spektar dobiven mrežicom može se i o b j e k t i v n o predočiti na bijelom zastoru. — Kod spektara od mrežice može se postići **veći** r a s a p nego li kod spektara od prizme, a imadu i tu prednost, da se kod njih može izračunati dužina vala svjetlosti. Za potonje treba znati konstantu mrežice d i izmjeriti kut φ_1 ili φ_2 i t. d., pa se onda dužina vala izračuna iz jedne od gornjih formula.

Mrežicom se lako pokazuje, da je žuta crta natrijeva (D-crta) dvostruka crta s dužinama vala 5890 i 5896 Å (Ångstr. jedinica, § 2.). Dužina je vala zelene svjetlosti živine 5461 Å.

Ovdje natuknuto (Fresnelovo) tumačenje ogiba spaja H u y g e n s o v u pomisao elementarnih valova i Y o u n g o v o načelo interferencije. Način, kojim Huygens traži rezultantu elementarnih valova, opravdava se samo uspjehom svojim, a ne vidi se razlog, zašto bi morale vrijediti Huygensove konstrukcije. Fresnel ispitujući i n t e r f e r e n c i j u e l e m e n t a r n i h v a l o v a uklanja taj nedostatak.

U današnjim se spektralnim spravama s mrežicama obično uzimlju mrežice s r e f l e k s i j o m; to su kovna zrcala, na kojima su urezane usporedne crte. Ta zrcala mogu biti i konkavna, što nadomješta leću (R o w l a n d 1832). — Imade spektralnih sprava, koje daju još veću disperziju negoli sprave s mrežicama. One pokazuju, da su spektralne crte — kakogod se pričinjaju u običnim spektroskopima uske — uistinu vazda donekle široke, u svojim dijelovima nejednako svjetle i često složene od više crta. Gotovo se i ne može naći crta bez takve „strukture", pa homogene svjetlosti zapravo i nema. Crvena crta kadmijeva spektra jest i u tim najjačim spetroskopima vrlo uska, pa se zato mogla vrlo točno odrediti dužina vala te svjetlosti; ona je 6438·4696 Å (u suhom uzduhu, kod tlaka 760 mm i temperature 15 °C).

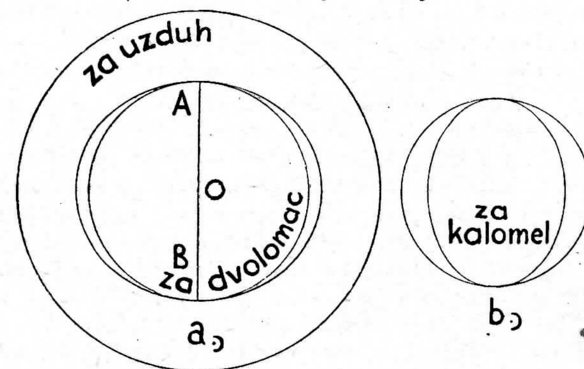
Mjesec je gdjekada okružen svjetlim krugovima m a l e n i h polumjera; pojav taj nastaje ogibom svjetlosti na česticama vode u atmosferi. Isti pojav vidimo, ako Mjesec ili koji drugi izvor svjetlosti motrimo kroz staklenu ploču posutu crvotočinom (likopodijem) (F r a u n h o f e r).

Zad. **255.** Kolika je dužina vala svjetlosti Fraunhoferove E-crte, ako je mrežica, koja ima 1000 crta na širini 1 cm, otklanja u spektru 2. reda za 6° 3′? [0·000527 mm]

Zad. **256.** Mrežica otklanja homogenu svjetlost u spektru 1. reda za 10°; kolik je otklon u spektru 2., 3., 4. reda? [20° 19′, 31° 24′, 44° 0′]

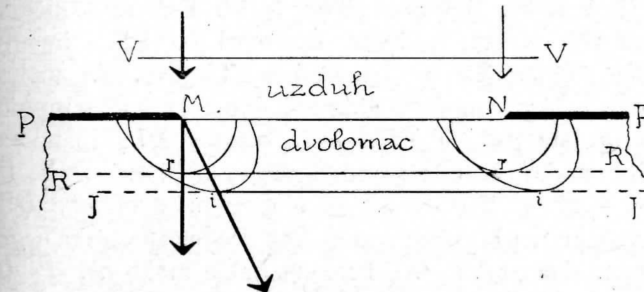
Zad. **257.** Kolika je konstanta mrežice, koja svjetlost dužine vala 5893 Å. jedinica otklanja u spektru 1. reda za 20° 22′ 0″? [0·001693 mm]

304. Dvolom. Ruda v a p n e n a c (kalcijski karbonat, $CaCO_3$), koja se ledi u heksagonalne lece (romboedar i njegove kombinacije), a našla se u Islandiji, ima osobito svojstvo, da kroz nju predmete vidimo d v o s t r u k o; dolazi to otuda, što se zraka svjetlosti ulazeći u tu rudu lomom cijepa u d v i j e zrake; ruda se zato i zove i s l a n d s k i d v o l o m a c (B a r t h o l i n 1669.). Zakone, što vrijede za lom u dvolomcu, našao je H u y g e n s (1678.). Jedna se lomljena zraka vlada po običnom (Snellovu) zakonu loma (§ 274.), pa se ta zraka zove r e d o v i t a. Za drugu lomljenu zraku — i z v a n r e d n u — vrijedi zamršeniji zakon. Kako je osobit zakon loma izvanredne zrake, pokazuju ove činjenice: i onda kad svjetlost pada okomito na površinu dvolomca, izvanredna je zraka uopće različna od redovite, dakle n i j e okomita na površini (dok je po Snellovu zakonu kut loma jednak 0, ako je kut doraza = 0); osim toga dok kod običnog loma lomljena i upadna zraka određuju ravninu okomitu na površinu, za izvanrednu je zraku ta ravnina — izuzevši osobite primjere — kosa na površini.



Sl. 363.

Lomljene se zrake u kojemgod primjeru dobivaju primjenom Huygensova načela t. j. konstrukcijom elementarnih valova (kao u § 249.); no elementarni val ovdje nije naprosto kugla, već je složen od dvije plohe: 1.) od kugle, 2.) od sploštenog rotacionog elipsoida, koji je kugli opisan, te je os elipsoida AB = promjeru kugle (sl. 363a). Prema tome svjetlost se u dvolomcu od kojegod točke O širi tako, da se razdijeli u dva dijela: jedan dio (redoviti) ide na sve strane jednako brzo, te u jednakim vremenima u različitim smjerovima prevali jednake putove; drugi



Sl. 364.

dio (izvanredni) u različitim se smjerovima rasprostire različnim brzinama, te su u jednakim vremenima prevaljeni putovi različiti. Smjer *OA*, u kojem se i redovita i izvanredna svjetlost šire jednakim brzinama, zove se optička os dvolomca; smjer je optičke osi isti, koji je i smjer kristalografske glavne osi.

Razmotrit ćemo primjenu te valove plohe u jednom primjeru. Zrake svjetlosti neka padaju iz uzduha okomito na površinu *PP* dvolomca (sl. 364.); dio *MN* te površine neka je slobodan, a ostatak neka je zastrt. Val svjetlosti *VV* svagdje u isti čas udari na *MN*, pa se oko svih točaka plohe *MN* u isti čas počnu rasprostirati elementarni valovi, to jest kugle i elipsoidi. Ravnina *RR*, koja tiče sve kugle, predočuje redoviti lomljeni val, dok je ravnina *JJ*, što tiče sve elipsoide, izvanredni lomljeni val. Kako val u širinu seže samo dotle, gdje se još susjedni elementarni valovi presijecaju, razabiramo, da je val *JJ* pomaknut na stranu. Zamislimo li slobodni dio površine *MN* sve manji, izlazi sve uži svežanj *rr* redovite svjetlosti i sve uži svežanj *ii* izvanredne svjetlosti, pa vidimo, da je potonji svežanj prema okomici priklonjen.

U osobitom primjeru, da je površina okomita na optičku os, a svjetlost i opet pada okomito na površinu, val se *JJ* podudara s valom *RR*; u tom se slučaju izvanredna zraka podudara s redovitom. Uzme li se dakle dvolomac, koji imade dvije plohe okomite na os i to bilo od prirode (osnovni pinakoid) bilo brušenjem načinjene, pa ako motrimo svjetlu točku kroz te plohe gledajući smjerom okomitim, vidjet ćemo svjetlu točku samo jednostruku.

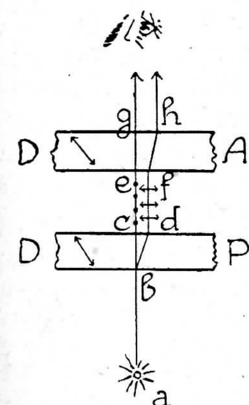
Poput dvolomca vladaju se svi leci heksagonalnog i tetragonalnog sustava. U jednoj su skupini tih ledaca rotacioni elipsoidi elementarnih valova splošteni i opisani kuglama, a u drugu skupinu idu leci, kod kojih su rotacioni elipsoidi duguljasti i upisani kuglama (sl. 363. b). U potonju skupinu idu kvarc, led (slab dvolom), kalomel i t. d. u prvu dvolomac, turmalin, korund i t. d. Leci teseralnoga sustava (na pr. slankamen, dijamant i t. d.) lome svjetlost jednostavno. Dvolom u ledaca rombičkog, monokliničkog i trikliničkog sustava još je zamršeniji nego li u dvolomca. Njegove je zakone našao Fresnel (1821.); ovdje se nijedna lomljena zraka ne vlada po zakonu Snellovu, a dva su smjera, u kojima se jedna i druga lomljena zraka jednako brzo šire, pa kažemo, da ti leci imadu dvije optičke osi ili da su dvoosi, dok su leci poput dvolomca jednoosi.

Ako homogena tvar u različitim smjerovima imade jednaka svojstva, zove se i izotropna (grč. ἴσος, *jednak*; τρέπω, *okrećem*); leci imadu u različitim smjerovima uopće različita svojstva, pa se zovu anizotropni (grč. ἀν, niječna čestica); leci su teseralnog sustava s obzirom na svjetlost izotropni, s obzirom na elastičnost anizotropni.

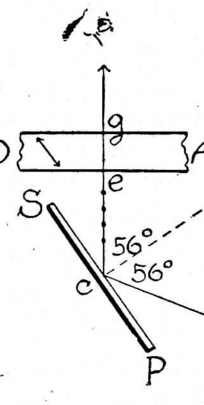
305. Polarizacija. Ako svjetlost ide redom kroz dva komada dvolomca, prvi će dvolomac od zrake svjetlosti načiniti dvije, a drugi će od te dvije načiniti 2 · 2 t. j. 4 zrake. Međutim jakost je tih 4 zraka različita, pa dvije od njih mogu sasvim iščeznuti. Neka dvolomci *DP* i *DA* imadu oblik ploča (sl. 365.), koje su namještene usporedno i to tako, da su im optičke osi (u slici dvostruke strelice) usporedne s jednom istom ravninom (ravninom crtnje). Zraka *ab*, što pada okomito na dvolomac *DP*, rastavlja se u dvolomcu u redovitu zraku *bc* i izvanrednu *bd*, a obje te zrake iz ploče izlaze okomito (isp. § 277.). Te se zrake ulazeći u dvolomac *DA* više ne razdvajaju, već prva (*ce*) ulazi samo kao redovita zraka (*eg*), druga (*df*) samo kao izvanredna zraka (*fh*). Premda dakle zrake *ab*, *ce* i *df* na oko jednako unilaze u dvolomac, ipak se one pri tom različito vladaju.

(Ako se ploča *DA* sama u sebi zakrene za $^1/_4$ okreta, pojav se za toliko promijeni, što sada od zrake *ce* postane izvanredna zraka, a od zrake *df* redovita.)

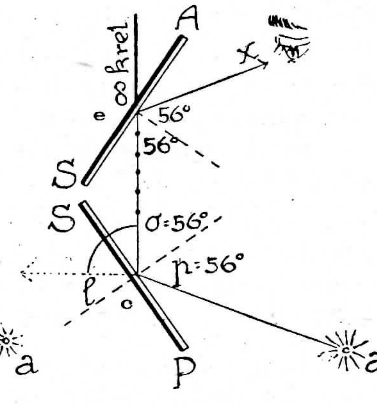
Te je činjenice opazio Huygens, no nikako ih nije umio objasniti; Newton je nabacio misao, da zraka svjetlosti „imade strane“, a to će reći: ako kroz zraku položimo mnoge ravnine, ne treba zraka s obzirom na sve te ravnine imati jednaka svojstva. Nauka se u velike stala zanimati tima činjenicama, kada je (g. 1808.) Malus našao, da se i odbijanjem svjetlosti mogu dobiti isto takve zrake kao i dvolomom. Od svjetle točke *a* (sl. 366.) neka pada zraka svjetlosti *ac* na staklenu ploču *SP* straga pocrnjenu, tako da se svjetlost samo na prednjoj strani odbija; kut doraza neka je kojih 56°, a odbijenu svjetlost (zraka *ce*) motrimo kroz dvolomac *DA*. Uz izvjestan će namještaj dvolomca u nj ulaziti samo redovita zraka,



Sl. 365.



Sl. 366.



Sl. 367.

eg, pa ćemo svjetlost točke *a* vidjeti jednostavno (to će biti, ako je optička os dvolomca usporedna s ravninom odbijanja *ace*).

U neku je ruku jednostavnije, ako se pokusi te vrsti izvode sa dvije staklene ploče *SP* i *SA* (sl. 367.). Svjetlost, što je udarila pod kutom doraza 56° na ploču *SP* (zraka *ac*), neka se odbije prema drugoj ploči *SA* (zraka *ce*), gdje je kut doraza opet 56°, a iza odraza na drugoj ploči svjetlost ulazi u oko (zraka *ex*). Ako se ravnina odbijanja na drugom staklu (ravnina *cex*) podudara s ravninom odbijanja na prvom (ravnina *ace*), oko vidi izvor *a* najsvjetlije; ako se onda staklo *SA* toliko okrene oko pravca *ce*, da su te dvije ravnine jedna na drugoj okomite ($cex \perp ace$), svjetlost se uguši, te se zraka *ce* kod takvog namještaja ploča za čudo uopće ne odbija.

Malus zove zraku *ce* polarizovanom, jer da čestice svjetlosti, koje po teoriji emisije lete u zraci svjetlosti, imadu polove, a u zraci *ce* spojnice polova svake čestice jesu istoga smjera i okomite na zraci. Kut doraza

*

56^0 zove se kut polarizacije, a ravnina *ace* ravnina polarizacije zrake *ce*. Sprava, kojom se dobiva polarizovana svjetlost, zove se polarizator (u slici 365. dvolomac *DP*, u sl. 366. i 367. staklena ploča *SP*). Sprava, kojom se ispituje, je li svjetlost polarizovana, zove se analizator (u sl. 365. i 366. *DA*, a u sl. 367. *SA*).

Ako se svjetlost umjesto na staklu odbija na površini vode, kut je polarizacije 53^0 t. j. kut doraza treba da je 53^0, ako hoćemo, da odbijena zraka bude polarizovana. Općenito vrijedi zakon: ako je kut doraza jednak kutu polarizacije *p* (sl. 367.), lomljena zraka stoji okomito na odbijenoj zraci (Brewster 1817.).

Pristaše undulatorne teorije svjetlosti isprva mišljahu, da se svjetlost širi u eteru poput zvuka, t. j. longitudinalnim valovima. Young (1817.) a valjda još prije Fresnel upoznaše, da to ne može biti, već da su valovi svjetlosti transverzalni. Po Fresnelu se polarizovana zraka *ce* (sl. 367.) razlikuje od „prirodne" svjetlosti *ac* u tom, što u polarizovanoj zraci „čestice etera" titraju u pravcima okomitima na ravnini polarizacije (u sl. 367. predočen je smjer titranja točkicama, koje znače pravce okomite na ravnini crtnje), dok u zraci prirodne svjetlosti čestice titraju u svima smjerovima, što su na zraci okomiti. Otuda izlazi, da je kod dvolomca smjer titranja u redovitoj zraci okomit na optičkoj osi i na smjeru titranja u izvanrednoj zraci, tako da su ravnine polarizacije jedne i druge lomljene zrake međusobno okomite. To i jest razlika između zrake *ce* u sl. 365. i zrake *df* i razlog, što se one različito vladaju, kad prelaze u dvolomac.

Na toj je pomisli Fresnel sazdao svoju teoriju dvoloma (isp. prеđašnji §) a i teoriju loma i odbijanja kod običnih prozirnih tvari (1823.); potonja teorija nije samo objasnila poznatih već zakona nego nas je upoznala s novim činjenicama. — Za odbijanje svjetlosti na kovnom zrcalu vrijede zamršeniji zakoni, te ne možemo dobiti polarizovane svjetlosti običnim zrcalom. — Ako se eterom šire transverzalni valovi na pr. kao u štapu, treba držati, da je eter čvrsta tvar; u drugu ruku ne možemo ga smatrati čvrstim, kad znamo, da on nebeska tjelesa nikako ili gotovo nikako ne priječi u njihovim putovima. Trebalo je dakle mnogo smjelosti, da se postavi teorija transverzalnih valova svjetlosti, pa oni ostadoše kamenom smutnje fizikalne nauke, dok god se nije „elastička" undulatorna teorija svjetlosti nadomjestila „elektromagnetskom" undulatornom teorijom. Elastička je teorija učila, da se svjetlost širi poradi elastičnosti etera, kako se valovi zvuka šire poradi elastičnosti uzduha; po elektromagnetskoj su teoriji valovi svjetlosti elektromagnetski valovi, pa njihovo rasprostiranje stoji do električkih svojstava prostora. Našlo se, da u valovima svjetlosti upravo titranje električne sile ima smjer, što ga je Fresnel pripisivao titranju etera. — Naziv „polarizacija svjetlosti" proizašao je iz teorije emisije i toliko se uvriježio, da nije ni danas zamijenjen drugim.

Ako u pokusu prikazanom u sl. 367. zraka *ac* pada na staklenu ploču pod kutom doraza, koji je različan od kuta polarizacije, ne će biti nijednog položaja ploče *SA*, kod kojeg bi se odbijena zraka *ex* sasvim ugušila. Vrteći ploču *SA* oko zrake *ce* vidjet ćemo, da se jakost svjetlosti *ex* mijenja

tako, da je najmanja vrijednost veća od 0. Svjetlost *ce* zove se onda djelomično polarizovana. — Polarizovana svjetlost ispitivana u ovom § zove se često i linearno ili pravčasto polarizovana za razliku od eliptički polarizovane, koju samo imenom spominjemo. (Isp. § 244.).

306. Polarizatori. Kad se polarizovana zraka dobiva dvolomom, nepriličnoj je, što dvije polarizovane zrake jedna drugu prate. Staklena je pak ploča kao polarizator zato slabo prikladna, jer se odbijanjem svjetlost skreće u drugi smjer. Nicol je iz dva komada dvolomca sastavio prizmu (1828.), kroz koju samo jedna polarizovana zraka prolazi, dok se druga zgodnim načinom ukloni; ta se prizma zove nikol. Ako u nikol ulazi prirodna svjetlost, izlazi ona s druge strane linearno polarizovana; nikol je onda polarizator. Ako u nikol puštamo (linearno) polarizovanu svjetlost, pa nikol vrtimo oko zrake svjetlosti, iz nikola izlazi polarizovana svjetlost, koja u razmacima od $^1/_2$ okreta iščezava; nikol kao analizator.

Ako za vedra dana motrimo nebeski svod kroz nikol, pa nikol vrtimo, opažamo, da je nebo na različitim mjestima različito jako polarizovano (Arago 1809.). Ta polarizacija stoji do namještaja Sunca; u vertikalnoj ravnini, što ide kroz oko i Sunce, nalaze se dvije ili tri „neutralne" točke, kojih svjetlost nije polarizovana.

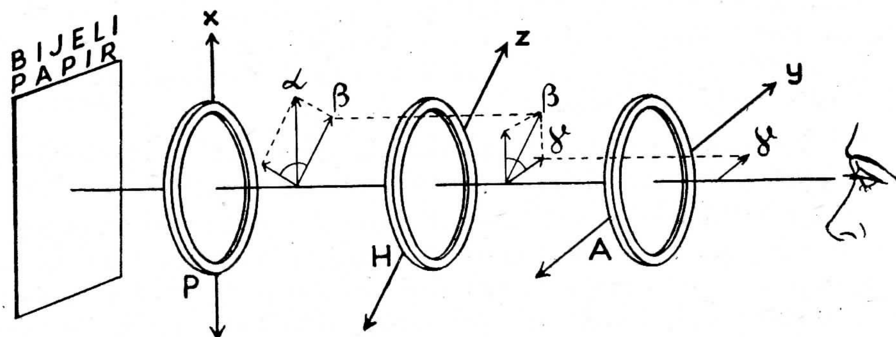
Radi rijetkosti velikih valjanih komada kalcita nikoli sa širokim vidnim poljem vrlo su skupi; radi neznatne tvrdoće kalcitove lako se ozlijede.

Ako svjetlost putuje kroz turmalin okomito na optičku os, redovita se zraka apsorbira već u tankom komadu toga leca. Preostaje samo izvanredna zraka, tako da turmalinova pločica brušena paralelno optičkoj osi može služiti kao polarizator poput nikola ili staklene ploče. Međutim svjetlost izlazi iz te pločice bojadisana (zeleno ili ljubičasto), što umanjuje vrijednost toga polarizatora.

Slično kao turmalin, ali bolje djeluje umjetni ledac herapatit (Herapath 1852.), a i leci nekih drugih tvari: polarizovana svjetlost iz njih izlazi ponešto sivkasta i samo slabo bojadisana, tako da za nikolom kao polarizatori mnogo ne zaostaju. Međutim nijedan se od njih ne da načiniti kao veći i dosta čvrst primjerak. Ipak se od g. 1936. mogu dobiti polarizatori građeni iz takvih ledaca i to u komadima po volji širokima. Takav je polarizator polaroid (Land) i herotar (Bernauer). Kod njih se među dva stakla a u tankom sloju zgodne izotropne prozirne tvari nalazi gusta hrpa mikroskopskih ledaca poput herapatita; naročitim postupcima umiju te lečiće optički valjano orijentirati, tako da cijeli sloj optički djeluje poput jednoga leca i stvara polarizovanu svjetlost. Zgodno je, da se na svakom primjerku smjer titranja naznači.

307. Pokusi s polarizovanom svjetlošću. Svjetlost, što je prošla kroz nikol ili drugi koji polarizator ili analizator, ima sasvim određen smjer titranja. Kod mnogih se pokusa pušta svjetlost redom kroz polarizator i analizator, a između obje se te sprave umetne još treća koja polarizaciona sprava ili ledac. Kažemo, da su nikoli, polaroidi i t. d. „u s p o r e d n i“, ako je smjer Y titranja svjetlosti, što izlazi iz analizatora, usporedan smjeru X titranja svjetlosti, što je izašla iz polarizatora; ako su ti smjerovi jedan na drugome okomiti, nikoli, polaroidi i t. d. su „s k r š t e n i“. Ako su dva nikola skrštena, ne vidimo kroz njih izvora svjetlosti.

I. P o l a r i z a t o r m e đ u p o l a r i z a t o r i m a. Među skrštene polaroide P i A sa smjerovima titranja x i y (sl. 368.) uvrstimo još treći polaroid H sa smjerom titranja Z i vrtimo ga oko srednje zrake svjetlosti; ako gledamo kroz te tri sprave izvor svjetlosti, svjetlost iščezne u razmacima od $^1/_4$ okreta. Tumačenje: Rastavimo amplitudu α titranja svjetlosti, koja je izašla iz P, u dvije kom-

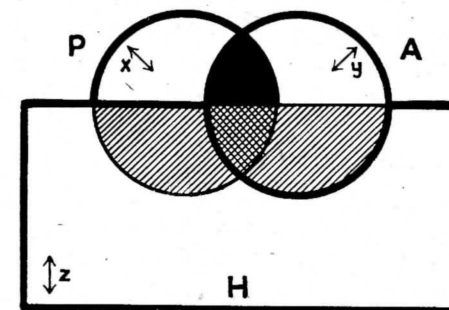


Sl. 368.

ponente, jednu β u smjeru z, drugu okomito na taj smjer. Prva će komponenta proći kroz H, dok će se druga tim polaroidom ukloniti. Prije no što svjetlost stigne na analizator, rastavimo β opet u dvije komponente, jednu γ u smjeru y, drugu u smjeru x. Sada će samo komponenta γ proći kroz analizator. Tako dakle od titranja smjera x nastaje titranje smjera okomitoga. Ako je $z \parallel x$, izlazi $\beta \parallel \alpha$, pa je $\gamma = 0$; ako je $z \perp x$, onda je već samo $\beta = 0$. (U tim se konstrukcijama nismo obazirali na to, da se dio svjetlosti odbijanjem i apsorpcijom gubi.)

P o k u s: Tri polaroida P, A i H sa smjerovima titranja x, y i z namjestimo tako, da je H ispred P, A ispred H i da im se polja djelomice poklapaju (sl. 369.); kroz tu kombinaciju gledamo na bijelu, rasvjetljenu površinu. Ako je $x \perp y$, bit će dio vidnoga polja, gdje se P i A

poklapaju, neproziran. — Ako je $\sphericalangle xz = 45^0$, dakle i $\sphericalangle zy = 45^0$, proći će kroz P i H slabija svjetlost; isto tako kroz H i A. Gdje je pak između P i A umetnut H, tamo svjetlost p r o l a z i (ako i slabije nego li kroz P i H)!



Sl. 369.

Zad. **258.** Neka je $y \parallel x$; uz koji će smjer z svjetlost iščeznuti?

[Onda, kad je $z \perp x$]

Zad. **259.** Šta se zbiva, ako u pokusu sl. 369. mijenjamo $\sphericalangle zx$?

II. V r t n j a s m j e r a t i t r a n j a. Među lecima, koji svjetlost dvostruko lome, osobitim se svojstvom odlikuje k v a r c ili prozirac SiO_2. Ako polarizovana svjetlost ide smjerom optičke osi kvarca, r a v n i n a s e p o l a r i z a c i j e v r t i oko te osi; vrti se dakle i s m j e r t i t r a n j a. Ako je izvor svjetlosti natrijev plamen (D-crta), smjer se titranja na putu zrake dugačkom 1 mm zakrene za $21{\cdot}7^0$ (kod temperature 20 °C), na putu 2 mm za $43{\cdot}4^0$, a na putu 0·1 mm za $2{\cdot}17^0$ i t. d.

Prije se spomenulo, da se kroz skrštene nikole ne vidi izvor svjetlosti; no ako se među skrštene nikole uvrsti kvarcova pločica brušena okomito na optičku os, tako da svjetlost ide duž te osi, svjetlost postaje vidljiva; hoćemo li, da nam vidno polje opet utrne, treba da analizator toliko zakrenemo, koliko se zakrenuo smjer titranja. Potonji zakret stoji još do boje svjetlosti; što je veća dužina vala svjetlosti λ, to je manji zakret smjera titranja. Za skrajnju crvenu boju spektra ($\lambda = 0{\cdot}0008$ mm, u uzduhu) taj se smjer na putu 1 mm u kvarcu zakrene za kojih 11^0; uzme li se skrajnja ljubičasta svjetlost ($\lambda = 0{\cdot}0004$ mm), zakret je na jednakom putu otprilike 49^0.

Ako smjerom optičke osi puštamo kroz kvarc b i j e l u polarizovanu svjetlost, izaći će iz kvarca svjetlost, kojoj svaka boja ima drugi smjer titranja. Ako je put svjetlosti u kvarcu na pr. 5 mm, pripadat će

dužinama vala:	0·0008 mm	(crveno)	zakreti:	55^0
	0·00064	(crveno)		baš $^1/_4$ okreta
	0·00046	(modro)		baš $^1/_2$ okreta
	0·0004	(ljubičasto)		$^1/_2$ okreta $+ 66^0$.

Ako su polarizator i analizator skršteni, svjetlost će dužine vala 0·00064 potpuno prolaziti kroz analizator, dok će se svjetlost dužine vala 0·00046 analizatorom ukloniti. U smjesi boja, što su prošle kroz analizator, izvjesne modre boje (0·00046) dakle uopće nema, a boje, što su njoj u spektru susjedne, izaći će oslabljene. Prema tome ta smjesa boja n e ć e b i t i b i j e l a. Ako su pak polarizator i analizator usporedni, ona će se boja

analizatorom ugušiti, koja je kroz skrštene nikole potpuno prolazila, dok će ona potpuno prolaziti, koja se prije uklonila. Ako se dakle analizator zakrene za $^1/_4$ okreta, boja prijeđe u komplementarnu.

Ako se umjesto analizatora uzme dvolomac, vidjet ćemo kvarcovu ploču dvostruku, a boje će obiju slika biti jedna drugoj komplementarne, te ćemo vidjeti lijep pojav, kako bijelo polje gdje se slike preklapaju graniči na dva komplementarno bojadisana polja.

Što će biti, ako se ti pokusi ponove sa debelom pločom. Ako je debljina na pr. 40 mm, smjer će se titranja skrajnje crvene boje spektra zakrenuti za 1 okret $+ 80^0$, a smjer titranja skrajnje ljubičaste boje za $5^1/_4$ okreta $+ 80^0$. Ako su dakle nikoli usporedni, uklonit će se iz bijele boje sve one sastojine, kojima su smjerovi titranja zakrenuti za $1\frac{1}{4}$, $1\frac{3}{4}$, $2\frac{1}{4}$, $2\frac{3}{4}$, $3\frac{1}{4}$, $3\frac{3}{4}$, $4\frac{1}{4}$, $4\frac{3}{4}$ ili $5\frac{1}{4}$ okreta. U smjesi je onda preostalo toliko različitih boja spektra, da je smjesa i opet bijela. Spektar je smjese dakle isprekidan tamnim prugama, kojih ima to više, što je kvarcova ploča deblja. Ako se analizator vrti, pruge se u spektru pomiču.

Smjer vrtnje ravnine polarizacije nije u svima lecima isti. Ako se za motrioca smjer titranja vrti onako, kako se vrte kazaljke na uri, kažemo, da vrtnja ide „nadesno"; njoj protivna vrtnja zove se vrtnja „nalijevo" („desni" i „lijevi" kvarc).

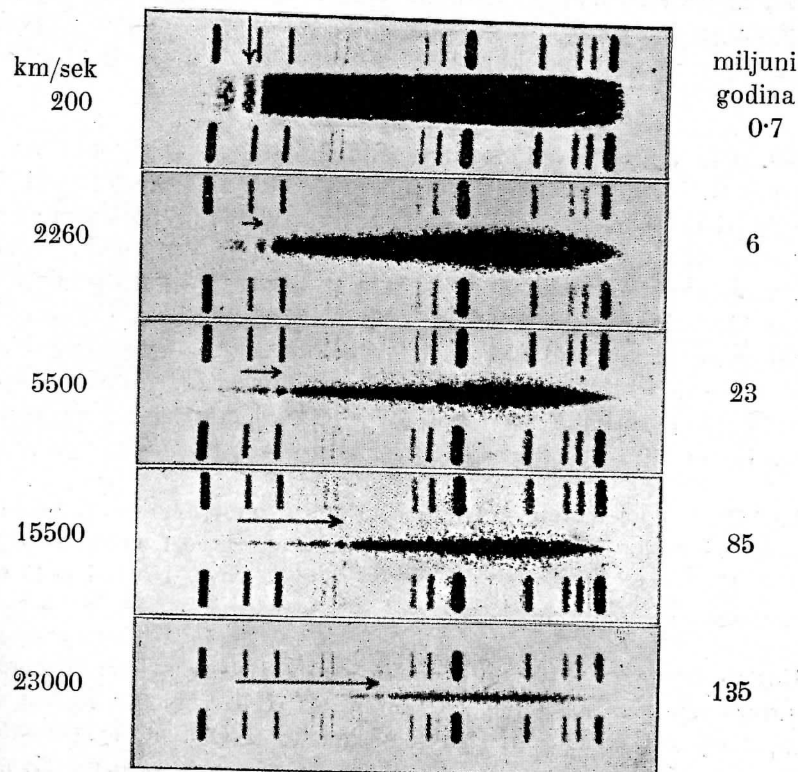
Pojave boja kod kvarca otkrio je Arago (1811.); da im je razlog vrtnja ravnine polarizacije, pokazao je Biot (1817.); on je našao i to, da i mnoge rastopine na pr. rastopina običnog pa i drugih sladora (saharoza i t. d.) vrte ravninu polarizacije. Ta je vrtnja kraj različitih koncentracija različita, pa se po veličini vrtnje može odrediti množina sladora (saharimetar; *σάκχαρ, slador*). Uostalom vrtnja je u kvarcu mnogo veća, jer on vrti ravninu polarizacije natrijeve svjetlosti 33 puta jače nego što je vrti jednako debeo sloj onakve rastopine običnog sladora, koja najjače vrti.

308. Dopplerov pojav kod svjetlosti. Budući da je svjetlost titranje, može se i kod nje opažati Dopplerov pojav (§§ 253. i 261.). Od zvijezde, koja sja svjetlošću frekvencije n titraja u sek, prima Zemlja n' titraja u sek, te je $n' > n$, ako se Zemlja i zvijezda približuju, a $n' < n$, ako se one udaljuju. No o broju n' zavisi mjesto svjetla u spektru, pa ako spektar zvijezdin sadrži bilo svjetle bilo tamne (Fraunhoferove) crte, bit će crte pomaknute prema ljubičastom kraju, ako se Zemlja zvijezdi približuje, a prema crvenom, ako se udaljuje. Odredivši mjesto spektralne crte u spektru zvijezde i znajući, gdje se ta crta nalazi u spektrima zemaljskih izvora svjetlosti, možemo dakle izračunati brzinu približavanja ili udaljivanja zvijezde.

Poradi Dopplerova pojava spektralne su crte plinova odebljane (Michelson 1892.: isp. završetak § 303.); jedne se molekule plina s većom a druge s manjom brzinom nama približuju ili od nas udaljuju, pa su u spektrima tih sitnih izvora svjetlosti crte različito pomaknute, a kako sve te spektre motrimo najedamput, izlaze crte odebljane.

Pomaci crta u spektrima zvijezda nisu veliki. Na pr. ako se u spektru zvijezde nalaze Fraunhoferova C-crta (u crvenom!), s dužinom vala 656 mμ, a zvijezda se približuje velikom brzinom 100 km/sek, dužina je vala za tu crtu smanjena samo za 0·22 mμ. A kada vodikov atom, koji emitira tu istu svjetlost, leti prema spektroskopu brzinom 1 km/sek, smanjenje dužine vala iznosi samo 0·0022 mμ.

Međutim sasvim neobični rezultati izlaze kod spektara nebeskih magla, koje ne pripadaju sustavu naše Mliječne Staze, već su udaljeni svjetovi ravnopravni Mliječnoj Stazi. Nametnula se zadaća, da se ispitivanjem Dopplerova pojava odredi gibanje našega sunčanoga sustava spram golemog mnoštva tih svjetova. Rješavanje te zadaće vodi na velike teškoće, jer od najbljeđih tih objekata ni najjači dalekozori (udešeni kao spektrografi) ne pokazuju u spektru drugih tančina osim Fraunhoferove H-crte i K-crte, koje su i u sunčanom spektru osobito jake (na ljubičastom kraju). Te se crte javljaju kod magla kao dva jasna prekida u inače neprekidnom spektralnom traku. Znameniti su rezultati, što ih je dobio Humason 1928. i dalje;



Sl. 370.

(reflektor sa zrcalom od 100 palaca). Fotografirajući spektre sve manjih t. j. sve udaljenijih magla dobio je spektre, u kojima su spomenuta dva prekida sve više pomaknuta prema crvenom kraju spektra i to za neobično velike iznose. Pet takvih spektara prikazuje sl. 370.; oni pripadaju maglama, koje su redom udaljene 700000 godina svjetlosti, pa onda 6, 23, 85, 135 miljuna godina svjetlosti. (Iznad svakoga spektra i ispod njega snimljen je radi ispoređivanja vazda isti spektar helijev.) Namještaj K-crte i H-crte označen je šiljkom strelice. Pomak tih crta upućuje, da se te magle udaljuju od nas brzinama, koje redom iznose 200 km/sek, pa onda 2260, 5500, 15500 i 23000 km/sek. Dodajmo k tomu, da je Humason g. 1935. snimio još i spektar jedne magle udaljene 247 miljuna godina, koja se udaljuje brzinom 42000 km/sek.

Drugim riječima: što je magla udaljenija, to većom brzinom se od nas udaljuje. Ako je zbilja tako, Svemir se rasteže. Međutim to se tumačenje maglenih spektara mnogima čini tako nevjerojatno, da sumnjaju, može li se kod tih spektara pomak crta shvatiti kao Dopplerov pojav ili mu treba tražiti drugo tumačenje. I tako je umjesto prvobitne zadaće iskrslo novo pitanje, koje je za fizikalno naziranje svijeta očito od najveće važnosti.

309. Fluorescencija i fosforescencija. Mnoge tvari, kad na njih pada svjetlost, i same svjetle. Da njihova svjetlost nije možda puki odraz prvobitne svjetlosti, razabira se, ako je tvar rasvjetljena homogenom svjetlošću; tvar će onda svjetliti svjetlošću druge boje. Taj pojav pokazuju na pr. kameno ulje, voda, u kojoj je nakvašena kora divljega kestena, rastopina klorofila, rastopina kinina, platinocijanbarij i t. d. Pojav se zove fluorescencija po rudi fluoritu (CaF_2). Energija fluorescencije izlazi iz energije one svjetlosti, kojom je fluorescencija izazvana. Potonja se dakle svjetlost gubi, apsorbira. Ta se apsorpcija (upijanje) dakle razlikuje od obične, gdje se od apsorbirane svjetlosti stvara toplina.

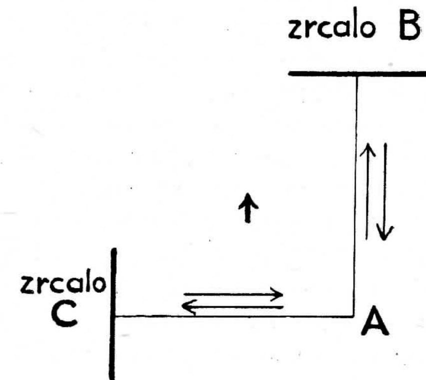
Ima tvari, koje nakon rasvjete i same u tami svjetle. Amo ide na pr. „bononski (bolonjski) kamen" t. j. ruda težac ($BaSo_4$) žarena s ugljenom (postolar Cascariolo, 1630.). Taj se pojav zove fosforescencija (po kemijskom elementu fosforu).

Uostalom imade i drugih primjera, gdje tjelesa svjetle, premda im temperatura nije visoka; poimence sam fosfor (i to „obični" fosfor) svjetli u tmini, što je u savezu s njegovom oksidacijom. Odavna je poznato, da i mnoge organske tvari svjetlucaju, na pr. meso, sluz, različite životinjice i t. d.; svjetlucanje mora.

310. Michelsonov pokus. Newtonova mehanika uči, da se ne može ispitivanjem mehaničkih pojava sasvim utvrditi, kakvo je naše apsolutno gibanje u Svemiru (§ 56.). Međutim se fizičari nadahu, da će to pitanje riješiti optičkim pokusima. Evo ovako:

Pomislimo Zemlju i na njoj dva mjesta *A* i *B*. Pita se, koliko će vremena trebati svjetlost, da stigne od *A* do *B*. Očekujemo, da će to vrijeme izaći veće, ako je u lijetu Zemlje kroz Svemir *B* ispred *A*, nego li onda, kad je *A* ispred *B*. U prvom naime slučaju *B* uzmiče pred svjetlošću, dok joj u drugom dolazi u susret. Brzina svjetlosti pričinjat će nam se dakle različitom — prema tome, kako je namješten smjer širenja svjetlosti prema smjeru apsolutnoga gibanja Zemlje. I apsolutno gibanje Zemlje imalo bi se odrediti baš time, da se ispitaju te prividne razlike brzina svjetlosti.

Da se riješi ta zadaća, zamišljen je ovaj pokus. U jednom laboratoriju pustimo iz točke *A* u isti čas dvije zrake, jednu prema zrcalu *B*, drugu u okomitom smjeru prema zrcalu *C* (sl. 371.). Zrcala neka su jednako udaljena od *A* i tako namještena, da odbijaju svjetlost opet u točku *A*. Ako je fizičar toga labolatorija pristaša nauke o apsolutnom prostoru i pomišlja, da njegov laboratorij zajedno sa Zemljom izvodi apsolutno gibanje u smjeru *AB*, lako će izračunati, da zraka *ABA* treba nešto više vremena do svoga povratka nego li zraka *ACA*. Naprotiv: kada bi se laboratorij apsolutno gibao smjerom *AC*, zakasnila bi zraka *ACA*. Sićušne razlike, koje taj fizičar očekuje, baš su dovoljne, da bi se jasno morale opaziti u „Michelsonovu pokusu". U tom pokusu zrake *ABA* i *ACA* vrativši se u točku *A* interferiraju i dobiveni pojav interferencije, kojega ne ćemo dalje opisivati, zavisan je o tom, koja zraka zakašnjava i koliko zakašnjava. Očekivalo se dakle, da će se pojav mijenjati, kadgod se promijeni orijentacija aparature *ABC* prema Svemiru.



Sl. 371.

Međutim ništa od toga se nije opazilo, baš kao da zrake *ABA* i *ACA* kod svake orijentacije trebaju točno jednako vrijeme za svoje putove, drugima riječima: baš tako kao da laboratorij apsolutno miruje! (Michelson i Morley 1887.).

Kako da se shvati taj paradoksni negativni rezultat pokusa? Lorentz je, da se približi rješenju toga pitanja, iznio hipotezu (g. 1895.), da su sva tjelesa u smjeru svoga apsolutnoga gibanja prikraćena. Ta „Lorentzova

kontrakcija“ to veća je što je veća brzina tijela i baš je tolika, da za obje zrake u Michelsonovu pokusu izađe jednako vrijeme putovanja. Koje bi sile bile uzrok tom hipotetičkom skraćivanju, nije se moglo reći. A ne bi se dalo to skraćenje ni pokazati neposredno, jer se gibanjem skraćuju i mjerila.

Drugim je putem pošao Einstein, koji je vođen Michelsonovim rezultatom sazdao novu, relativističku, nauku o prostoru i vremenu (1905.). Jedan je osnov te nauke načelo stalne brzine svjetlosti. Ono kazuje: ako neki fizičar F nađe, da je brzina svjetlosti c (mjerena u praznom prostoru) za sve smjerove jednaka, onda će kojigod drugi fizičar Φ, koji se spram prvoga relativno giblje jednolikom usporednom translacijom (§ 31.), i sa svoga gledišta naći, da je brzina svjetlosti za sve smjerove jednaka, tako da se ne može otkriti neka tobožnja apsolutna translacija.

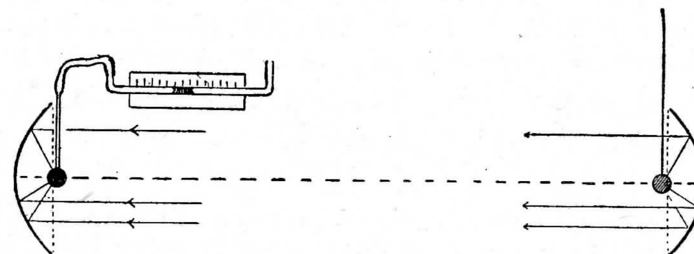
To se načelo ne da združiti sa naukom o apsolutnom prostoru i vremenu, tako da prema Einsteinu fizičari F i Φ mjereći prostor i vrijeme nalaze različite rezultate. Tako kod izmjerivanja vremena izlazi nova, nikada prije nabačena misao: ako fizičar F utvrdi za dva pojava, koji se dogode na raznim mjestima, da su istodobni, ne će oni izaći istodobni fizičaru Φ. Drugim riječima: nema apsolutne istodobnosti. Moglo bi se prigovoriti: zar ne bi F i Φ mogli udesiti svoje ure, da budu svagdje u skladu? zar ne može fizičar F sabrati na jednom mjestu mnogo izvrsnih ura, udesiti ih jednu prema drugoj i onda jedne ure porazmjestiti na različnim mjestima svoga sustava, a druge predati fizičaru Φ? Relativistička nauka na to odgovara, da takvim postupkom nikako nije zajamčen skladni hod ura; treba naime pomisliti, da kod prenošenja ura nastaju mehanički pojavi, koji utječu na hod njihov i to drukčije kod ura, koje će se opet smiriti u sustavu fizičara F, a drukčije kod ura, koje prelaze u sustav Φ-ov, pa će trajno preuzeti brzinu toga sustava. — Relativistička nauka pomišlja, da se ure u sustavu svakoga fizičara imadu udesiti jedne prema drugima uz pomoć signala svjetlosti.

U uskoj svezi s tom relativnošću vremena jest relativnost prostora: ako štap usporedan smjeru relativne translacije miruje kod fizičara Φ, čini se fizičaru F kraćim; ako li ga preuzme fizičar F, te u njegovu sustavu miruje, izlazi prikraćen fizičaru Φ. Tijelo dakle nema nekih apsolutnih dimenzija, već za svakoga motrioca druge, prema tome kakva je brzina tijela relativno s obzirom na motrioca. (U opreci s time Lorentzova kontrakcija imala bi apsolutno značenje.)

Za druge tvrdnje relativističke nauke isp. § 57.).

5. Pojavi srodni sa svjetlošću

311. Toplinske i kemijske zrake. Ako zimi stojimo u sobi kod zatvorenog prozora, tako da nas Sunce obasjava, osjetit ćemo toplinu, što nam je Sunce šalje; pri tome staklo prozora ostaje hladno. Kažemo, da nam toplinu donose sunčane „toplinske“ zrake, koje je staklo propustilo. Toplinske se zrake šire pravcima i odbijaju se i lome po zakonima, koji vrijede za svjetlost. Hoću li se zakloniti od sunčanog žara, stupit ću u sjenu (zakon pravocrtnoga širenja!). Ako su dva konkavna zrcala jedno nasuprot drugome u razmaku od mnogo metara, te im se osi podudaraju, a u žarište jednoga zrcala stavimo kuglu termoskopa (sl. 372., lijevo), u žarište drugoga ugrijanu željeznu kuglu (u slici desno), termoskop pokazuje porast temperature (Pictet 1790.); pri tome toplinske zrake od željezne kugle padnu na bližnje zrcalo, na njem se odbiju te onda idući usporedno s osi stignu na drugo zrcalo i tamo se odbijanjem skrenu u njegovo žarište. Kod pokusa ove ruke zrcalo može ostati hladno, te se na pr. s pomoću konkavnog zrcala izbrušenog iz leda može sunčanim zrakama zapaliti u žarištu papir (Mariotte 1682.).



Sl. 372.

Ima tvari, koje propuštaju toplinske zrake, a ne propuštaju svjetlosti. Takva je na pr. rastopina joda u sumporougljiku. Puste li se sunčane zrake na staklenu šuplju kuglu, koja je napunjena tom rastopinom, mogu nam spomenute zrake zapaliti papir, koji držimo iza kugle na zgodnu mjestu (gdje se većina lomljenih zraka sastaje); a ipak je rastopina sasvim neprozirna.

Herschel je termometrom ispitivao spektar (1800.), pa je našao, da se termometar ugrijeva i onda, kad bi ga pomaknuo iza crvenoga kraja spektra. „Toplinski spektar“ seže dakle dalje negoli svjetli spektar.

Međutim osim tih tamnih zraka sunčanih imade još i takvih tamnih zraka, koje u spektru padaju iza ljubičastoga kraja. Otkrio ih je Ritter (1801.) ispitujući kemijsko djelovanje sunčanih zraka. Sunce izvodi jak učinak na fotografsku ploču još i onda, ako ploču stavimo u nastavak sunčanoga vidljivoga spektra iza ljubičastoga kraja njegova. Zrake, što tu djeluju, jesu „kemijske“ zrake.

Isprva mišljahu, da su toplinske, svjetle i kemijske zrake po biti svojoj različite, te da na pr. u žuti dio spektra padaju osim svjetlih zraka još i toplinske i kemijske. No Ampère je ustvrdio (1835.), da su te zrake istovetne. Prema tome spektar sunčani s obzirom na čovječje oko treba dijeliti u tri dijela:

1. vidljivi spektar; zrake, koje mu pripadaju, djeluju na oko, na termometar i na fotografsku ploču;
2. ultracrveni ili infracrveni (lat. *ultra, iznad; infra, ispod*) spektar; nadovezuje se na crveni kraj vidljivoga spektra; njegove zrake ne izvode oćuta svjetlosti, djeluju na termometar, dok im je kemijsko djelovanje neznatno;
3. ultraljubičasti spektar; nadovezuje se na ljubičasti kraj vidljivoga spektra; njegove zrake jako utječu na fotografsku ploču, dok im je toplinski učinak neznatan.

Zrake infracrvene imadu veće dužine vala negoli svjetlost, ova pak veće dužine negoli ultraljubičaste zrake. — Znanje o toplinskim zrakama osobito je unapredio Melloni, koji je spektar ispitivao termostupom i galvanometrom (§ 192.), te se baš njegovim opažanjima imade zahvaliti, da se Ampèreovo mišljenje (kojemu se Melloni opirao!) pokazalo valjanim.

Ultraljubičasti se spektar može opažati još i uz pomoć fluorescencije. Ako se u (nevidljivi) ultraljubičasti dio sunčanoga spektra ili spektra lučnice stavi ploča pokrita slojem platinocijanbarija, ona će svjetliti.

Prozirne tvari različito dobro propuštaju nevidljive zrake. Voda ne propušta infracrvenih zraka gotovo nikako. Zato kod projekcione sprave „vodena komora" (§ 286) štiti projiciran predmet i leću od prevelikog ugrijevanja. Staklo propušta infracrvene zrake samo do zraka, kojima je dužina vala 0·003 mm (dužina vala krajnjih crvenih zraka 0·0008 mm). Mnogo se dalje nalazi granica propuštanja za slankamen, tako da infracrveni spektar Sunca seže dalje, kad su prizme i leće od slankamena, nego li kad su od stakla. Još su zgodnije za dobivanje toplinskog spektra prizme i leće od fluorita (CaF_2) i silvina (KCl), jer slankamen od vlage pomuti. — Kvarc propušta mnogo veći dio ultraljubičastih zraka negoli staklo (isp. § 191.).

Obične fotografske ploče osjetljive su poglavito za modre, ljubičaste i ultraljubičaste zrake. Crvena boja, premda nam se u trobojnici pričinja svjetlijom od modre, ipak u fotografiji izilazi tamna. Ortokromatične ploče osjetljive su i za žutu boju (slabije za zelenu), pankromatične i za crvenu (grč. πᾶν, *sve*; χρῶμα, *boja*), a ima ploča i za infracrvene zrake. Potonjima mogu se snimiti krajevi, koji su oku maglom zastrti.

312. Žarenje crnoga tijela. Spektralne zrake prenose energiju. Vidi se to otuda, što se tjelesa, koja apsorbiraju te zrake, ugriju. Ako površina tijela nimalo ne odbija spektralnih zraka, što izvana na nju padnu, pa ako tijelo povrh toga ni najmanje zraka ne propušta, sve se zrake u tijelu apsorbiraju, pa nam toplina, koja se poradi toga u tijelu stvara, mjeri energiju spektralnih zraka. Tijelo, koje sve zrake apsorbira, znatno je dakle za mjerenje energije toplinskih zraka i takovo se tijelo zove „crno". Nema doduše savršeno crnoga tijela, ali imade na pr. čađe, koja apsorbira gotovo 99% energije spektralnih zraka, što na nju padnu.

Svako tijelo daje od sebe ili emitira spektralne zrake; poimence to vrijedi i za sasvim studena tjelesa (Prèvost 1791.). Ako ipak u blizini hrpe leda osjećam studen, dolazi to otuda, što toplinske zrake emitirane ledom donose tijelu mojemu manje topline, nego što tijelo topline gubi, jer i samo emitira toplinske zrake. — Kolika je energija pojedinih zraka, što ih tijelo emitira, zavisi ne samo o temperaturi već i o prirodi tijela.

Najbolje je ispitan žar crnoga tijela. Po Kirchhoffu, koji je opazio znatnost crnoga tijela (1859.), 1 cm² površine crnoga tijela emitira od bilo koje vrsti spektralnih zraka više nego što kod jednake temperature u jednakom vremenu emitira 1 cm² kojegagod drugoga tijela. A sveukupna energija E zraka emitiranih u 1 sek iz 1 cm² površine crnoga tijela razmjerna je sa 4. potencijom apsolutne temperature T tijela (Stefan 1879.). U formuli taj „Stefanov zakon" glasi

$$E = \sigma T^4.$$

Ako se energija mjeri gramkalorijama, faktor je razmjernosti $\sigma = 1{\cdot}38 \cdot 10^{-12}$. Prema tome 1 cm² površine crnoga tijela emitira u 1 sek kod 273 °K (t. j. 0 °C) 0·0077 gramkalorija, a kod 10 puta više temperature 2730 °K (t. j. 2457 °C) 10^4 puta više t. j. 77 gramkalorija.

Opažanja nas uče, da na Zemlji u velikoj visini nad morem sunčane zrake donose plohi veličine 1 cm² i okomitoj na zrakama svake minute 1·9 gramkalorija topline. Taj se broj zove „sunčeva konstanta" (Pouillet 1838.). Ako spomenuti cm² zamišljamo kao dio površine kugle opisane oko središta sunčanoga, te joj je polumjer (udaljenost Zemlje od Sunca) $15 \cdot 10^{12}$ cm, a površina $4 \cdot 15^2 \cdot 10^{24} \pi$ cm², razabiramo, da Sunce gubi žarenjem svake minute $4 \cdot 15^2 \cdot 10^{24} \pi \cdot 1{\cdot}9$ gramkalorija. Budući da je polumjer Sunca $695 \cdot 10^8$ cm, a površina $4 \cdot 695^2 \cdot 10^{16} \pi$ cm², emitira dakle svaki cm² sunčane površine u 1 min $4 \cdot 15^2 \cdot 10^{24}\pi \cdot 1{\cdot}9 : (4 \cdot 695^2 \cdot 10^{16}\pi) = 88510$ gramkalorija, što čini $E = 1475$ gramkalorija na cm² u sek. Kad bi Sunce bilo „crno" tijelo, izračunala bi se sada temperatura njegove površine iz formule $1475 = 1{\cdot}38 \cdot 10^{12} \cdot T^4$, što daje $T = 5718$ °K. No budući da crno tijelo jače emitira energiju nego li ikoje drugo, izlazi, da temperatura sunčane površine svakako nije niža od netom dobivenoga broja. Imade razloga držati, da je ona nekih 6000 °K.

Razdijeli li se spektar crnoga tijela u mnogo uskih područja, tako da u svakom području dužina vala jednako mnogo naraste, energija je spektralnih zraka za svako područje druga. Uz danu temperaturu za izvjesno je područje spektra energija najveća, a od toga se mjesta na obje strane

spektra energija smanjuje. Naraste li temperatura, svagdje se u spektru energija poveća, a uz to se područje maksimalne energije pomakne u smjeru prema kraćim valovima t. j. smjerom od infracrvenoga spektra prema svjetlom i ultraljubičastomu spektru. Kod obične temperature od 20 °C najveća energija pripada zrakama dužine vala 0·01 mm (u infracrvenom spektru). Do crvenoga se kraja svjetloga spektra (dužina vala 0·0008 mm) maksimum energije pomakne tekar kod temperature 3400 °C, a do ljubičastog bi kraja (dužina vala 0·0004 mm) taj maksimum stigao tekar kod 7100 °C. — Što vrijedi za crno tijelo, vrijedi slično i za druga tjelesa. Zato na pr. željezo, kojemu povisujemo temperaturu, počinje sjati najprije crvenim žarom (kod nekih 500 °C), kod više temperature žar prelazi u žuto, a kod još više u bijelo.

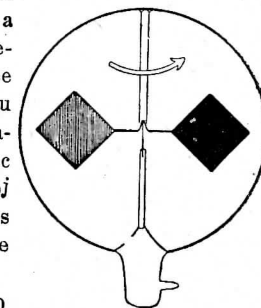
Iz Kirchhoffovih razmatranja izlazi, da zrake, što se šire u šupljini, kojoj stijene imadu posvuda jednaku temperaturu, imadu baš onakav spektar, kao da je površina šupljine savršeno crna. — Matematički zakon razdiobe energije u spektru crnoga tijela našao je teorijom Planck (1900.).

313. Tlak svjetlosti. Kad bi spektralne zrake bile onakve, kako ih zamišlja teorija emisije (§ 275.), korpuskula bi padajući na predmete na njih tlačila. Taj tlak nazvan tlakom „svjetlosti" isprva se bez uspjeha tražio, a kad je prevladala teorija undulacije, na nj se i zaboravilo. No kasnije je i teorija undulacije rodila rezultatom, da spektralni valovi tlače, pa je najposlije Lebedev pokusima taj tlak dokazao (1899.).

Taj je tlak uopće vrlo sitan, pa i samo Sunce unatoč silnom svom sjaju slabo svojim zrakama tjelesa pritiskuje. Ipak taj tlak može da nadjača privlačnu silu Sunca, a to će biti onda, ako sunčanim zrakama izložimo tijelo dosta sitno. Smanjivši naime promjer nekoga tijela na polovicu smanjili smo mu površinu dakle i tlak sunčane svjetlosti na četvrtinu, dok su pri tom obujam, dakle i masa i privlačna sila Sunca spali na osminu; privlačna se sila dakle brže umanjuje negoli tlak, pa kod sitnih tjelesa može spasti ispod vrijednosti tlaka.

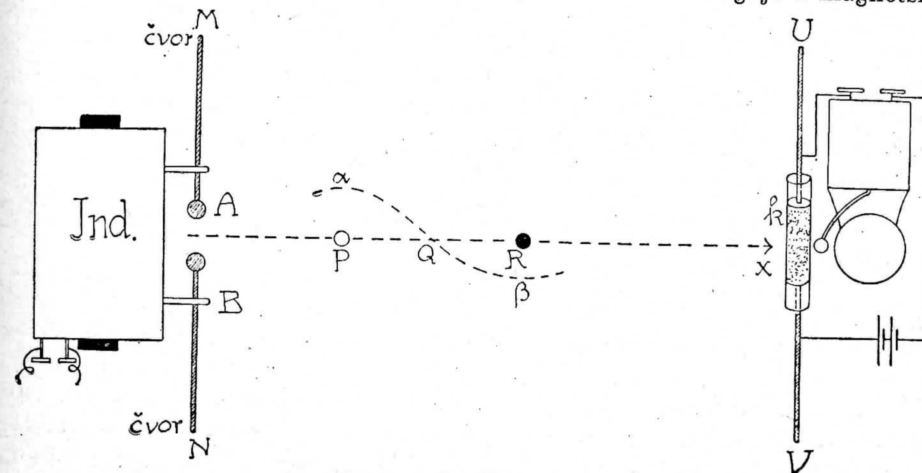
Čini se, da je tlak svjetlosti za mnoge kozmičke pojave odlučan; pokušali su njime tumačiti postojanje repa kod zvijezda repatica, a Eddington uvodi tlak svjetlosti kao bitan dio u svoju nauku u unutarnjosti stajačica (1916.). — Hipoteza o putovanju života kroz Svemir djelovanjem tlaka svjetlosti na sitne životne klice (Arrhenius).

Vrtnja, što je svjetlost izvodi u vrlo poznatom Crookesovu radiometru (1873.), nije učinak tlaka svjetlosti. U toj se spravi u razrijeđenom uzduhu mogu lako vrtjeti krilca od tinjca, koja su na jednoj strani počađena (sl. 373.). Izloži li se radiometar toplinskim zrakama, nastaje vrtnja i to takova, da svjetla strana tinjca ide naprijed. Gibanje ovdje nastaje udarcima molekula uzduha; kad je uzduh odviše razrijeđen, te nema dosta tih molekula, nema ni vrtnje. Na počađenoj strani svako se krilce jače ugrije negoli na sjajnoj strani, tako da je i uzduh uz počađenu stranu topliji, te su i njegove molekule brže. Poradi toga prevladava učinak udaraca molekula na počađenoj strani, te se tinjac pomiče onako, kako bi se kretala vrata, s kojih bi se na jednoj strani odbijale lopte s većim brzinama i u većem broju negoli s druge. — U uzduhu običnoga tlaka nema toga pojava, jer je otpor uzduha prevelik.



Sl. 373.

314. Elektromagnetski valovi (teorija). Uzmimo Ruhmkorffov induktor s iskrištem AB (sl. 374.), kojemu se na svaki pol nadovezuje po jedna kovna šipka AM, BN. Kadgod napetost dosta naraste, preskoči iskra t. j. nastaju električke oscilacije. Pri tom elektroni idu izmjenice jedamput od M prema N, drugi put od N prema M. U iskrištu je u svaki čas struja jača negoli igdje drugdje, dok je na krajevima M i N jakost struje trajno $= 0$ (trbuh i čvorovi, isp. § 251.). Vodič MN zovemo električki dipol, budući da se u njemu kod titranja na krajevima zgušćuju protivni električni naboji. Izmjenična struja, što teče vodičem MN, izvodi u okolišu magnetsko polje, te na pr. u točki P pripada struji smjera MN polje upereno naprijed (Ampèreovo pravilo, § 177.), a struji smjera NM polje, koje pokazuje natrag. Električke titraje u vodičima MN prate dakle titraji magnetskoga polja u točki P, a i u kojojgod drugoj točki okoliša. Isprva mišljahu, da se magnetski učinak širi „momentano"; t. j. u isti mah, kad je jakost struje u MN najveća, da je i jakost magnetskog polja u svima točkama P, Q, R . . . okoliša najveća, a kad je jakost struje $= 0$, da je u isti čas svagdje i magnetsko



Sl. 374.

polje jakosti 0. No Maxwell gledajući u izolatoru sredstvo, koje prenosi elektromagnetske učinke, uvidio je, da to nije tako, i ustvrdio je, da ti učinci stizavaju do udaljenijih točaka kasnije negoli do bližih.

Zamislimo redom časove, kad je struja u MN 1.) najjača i uperena od N prema M, 2.) = 0, 3.) najjača i uperena od M prema N. Magnetski učinak najranije t. j. 1. vrijednosti ide ispred magnetskoga učinka 2. vrijednosti, a ovaj ispred učinka treće vrijednosti. Na pravcu x, koji ide sredinom iskrišta, bit će dakle u određeni čas prvi učinak na pr. u R, drugi u Q, a treći tek u P; u R je onda magnetsko polje najjače i upereno natrag, u Q je jakost polja = 0, dok je u P jakost polja najveća i upravljena naprijed. Vrijedi li dakle Maxwellovo mišljenje, nalazimo u kojigod čas duž pravca x izmjenice mjesta, gdje je magnetsko polje upereno naprijed, i gdje ono pokazuje natrag. Budući da se kod valova vode isto tako pravilno izmjenjuju mjesta, gdje je površina iznad ravne površine mirne vode, s mjestima, gdje je ona ispod te ravnine, možemo dakle reći, da magnetsko polje u svaki čas imade valovit razmještaj, a valovi magnetske sile lete na sve strane.

S valovima se magnetske sile po Maxwellovoj nauci nerazdruživo šire valovi električne sile. Vidimo to ovako. U vodiču UV usporednom sa MN pobuđuju se inducirane električne struje, jer time što se šire magnetski valovi, pomiču se i magnetske silnice, koje se pri tom sijeku vodičem UV. Inducirana je pak elektromotorna (električna) sila to jača, što češće vodič presijeca silnice (§ 202.), pa je tamo, gdje nema magnetskih silnica (polje = 0), i elektromotorna sila = 0, a gdje su silnice najgušće (polje najjače), elektromotorna je sila najveća.

Val magnetske sile zajedno s valom električke sile zovu se elektromagnetski val, a gdjekada i kraće električki val. U elektromagnetskom je valu električka sila svagdje okomita na magnetskoj, a budući da su obje okomite na smjeru širenja, treba elektromagnetske valove svrstati među transverzalne valove. Pravci, kojima se šire ti valovi, zovu se elektromagnetske zrake. (U sl. 374. ordinate $P\alpha$, $R\beta$ predočuju jakost električkog polja.)

Za brzinu širenja elektromagnetskih valova u praznom prostoru našao je Maxwell teorijom, da je **jednaka brzini svjetlosti** (g. 1865.).

Zad. **260.** Dokažite poučak: U elektromagnetskom valu smjer električkoga polja, smjer magnetskoga polja i smjer širenja vala slijede u prostoru tako kao palac, kažiprst i srednji prst desne ruke, ako ih postavimo neprisiljeno otprilike okomito jedan na drugi.

[Dokaz s pomoću pravila desne ruke, § 201.]

315. Elektromagnetski valovi (pokusi). Valjanost Maxwellove teorije u svemu se utvrdila glasovitim pokusima, što ih je izveo Hertz (1887.); ti pokusi pokazuju za elektromagnetske valove iste pojave, što ih

poznajemo bilo kod svjetlosti bilo kod zvuka. Odlučno bijaše za uspjeh tih pokusa, što je Hertz za izvođenje valova izumio osobit „oscilator“, naime upravo oscilator MN predašnjega §. Dipol MN, u kojemu se zbivaju električki titraji, imade daleko razmaknute krajeve, pa je „otvoren“ oscilator. Takav oscilator emitira jače valove nego li „zatvoreni“ (na pr. lajdenska boca § 206.).

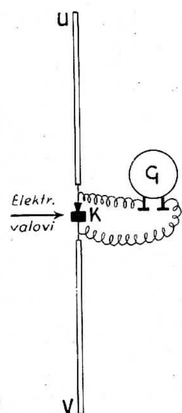
Za ispitivanje elektromagnetskih valova treba sprava, koja te valove pokazuje. Zove se ona detektor (lat. *detego, otkrivam*), a mora biti osjetljiva, da djeluje i u ovećoj daljini od oscilatora. — Hertzu služilo je kao detektor iskrište električkog resonatora (isp. § 243.), no bolji je detektor koherer. Staklena je cjevčica k (sl. 374.) ispunjena kovnom piljevinom i uklopi se u vodič UV, te čini dio kruga struje dobivene od galvanskoga članka; jakost struje pokazuje galvanometar. Pločice, između kojih je piljevina, slabo se utisnu, tako da je otpor koherera velik, te struje gotovo i nema. Pređu li valovi preko UV, otpor se koherera smanji, te pomak kazaljke galvanometra posredno pokazuje one valove. Međutim otpor koherera ostaje malen i iza prolaza valova, dok god koherer lakim udarcem ne potresemo. Umjesto galvanometra zgodno je uzeti električno zvono, kojega batić udara i na koherer, tako da zvonjenje prestaje zajedno s valovima. Koherer valjda time djeluje, što inducirane struje, koje su valovima izazvane, učine, da naraste temperatura na dotačištima zrnaca piljevine, te se susjedna zrnca svare i time se načine kao sitni mostići, koji olakšaju prelaženje struje. Trešnjom se ti mostići raskinu. Takvom tumačenju odgovara i ime sprave (lat. *cohaereo, spojen sam*). (Djelovanje koherera otkrio je Branly 1890.).

Drugi je način eksperimentiranja, da se u dipol-resonator UV (sl. 375.) uklopi umjesto koherera kristalni detektor K (§ 187.) i šiljak detektorov sastavi s jednom stezaljkom galvanometra G, ledac s drugom. Električki valovi induciraju u resonatoru izmjenične struje, a elektroni, koje pri tom detektor kao ventil propušta samo jednim smjerom, vraćaju se protivnim smjerom kroz galvanometar i to isprekidanom strujom, koja u galvanometru — radi njegove tromosti — izvodi trajan otklon.

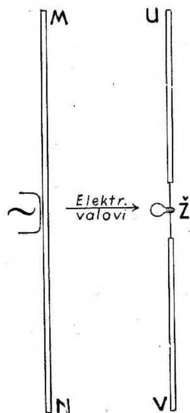
Ako su titraji dipola-oscilatora dosta jaki, možemo u resonatoru dobiti toliko jake struje, da se može detektor nadomjestiti žaruljicom $\check{Z}$, koja svjetlenjem pokazuje dolaženje valova. (Sl. 376.) To je osobito zgodno, jer je takav resonator lako pokretan.

Dipol-oscilator može biti bez iskrišta: neprekidan štap MN (sl. 376.), u kojemu oscilacije pobuđujemo indukcijom, na pr. s pomoću oscilacija, koje proizvodi elektronska cijev (§ 223.).

*



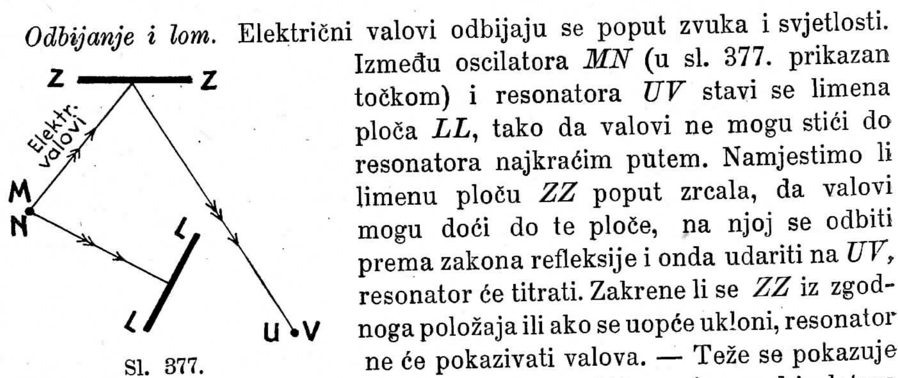
Sl. 375.



Sl. 376.

Pravocrtno širenje elektromagnetskih valova. Ako se između oscilatora MN i detektora UV stavi limena ploča ili ljepenka pokrita staniolom, detektor ne će pokazivati valova. Ti se valovi naime poput svjetlosti i zvuka šire pravcima, a vodič ne propušta električkih valova. Naprotiv kroz staklenu ploču, kroz zid i uopće kroz izolatore elektromagnetski valovi prolaze. Kod tih pokusa treba uzeti ploču dosta veliku, jer bi inače valovi ogibom oko ruba ploče stigli do detektora; što su dulji valovi, to bi veća ploča trebala. (Ako je dužina vala na pr. 90 cm, izlazi iz jednadžbe $90 = 3 \cdot 10^{10} \cdot T$, da je vrijeme titranja T = 0·000000 003 sek.)

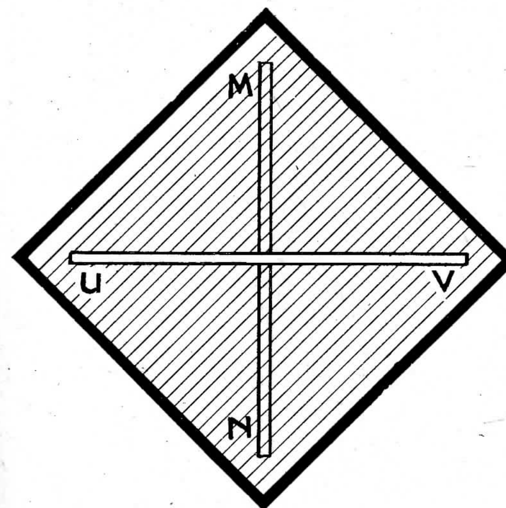
Odbijanje i lom. Električni valovi odbijaju se poput zvuka i svjetlosti. Između oscilatora MN (u sl. 377. prikazan točkom) i resonatora UV stavi se limena ploča LL, tako da valovi ne mogu stići do resonatora najkraćim putem. Namjestimo li limenu ploču ZZ poput zrcala, da valovi mogu doći do te ploče, na njoj se odbiti prema zakona refleksije i onda udariti na UV, resonator će titrati. Zakrene li se ZZ iz zgodnoga položaja ili ako se uopće ukloni, resonator ne će pokazivati valova. — Teže se pokazuje lom električnih valova, i to zato jer tome treba v e l i k a prizma od izolatora (asfalt, parafin).



Sl. 377.

Polarizacija. Budući da se kod oscilatora MN pravac električnoga titranja ne mijenja, ostat će u kojojgod točki polja pravac titranja električne sile nepromijenjen, a isto vrijedi za pravac magnetičke sile; prema tome valovi tako dobiveni idu u red polarizovanih valova (§ 244.). Resonator sa

žaruljicom jasno pokazuje polarizaciju: ako su oba dipola MN i UV usporedna, žarulja sja najjačim sjajem; ako je UV okomito na MN, žaruljica sasvim utrne. (Analogija u optici: usporedni nikoli, skršteni nikoli.). Polarizaciju nadalje pokazuju pokusi sa mrežom od žica, koje su usporedno razapete u ravnom okviru. Ako se mreža metne između oscilatora i resonatora, a žice su mrežine usporedne s oscilatorom MN, mreža ne propušta valova. Ako su pak žice okomite na oscilatoru, mreža ne priječi valovima prolaza. Ako je oscilator MN vertikalan, a resonator UV horizontalan, valovi ne će na detektor djelovati; no ako se sada stavi među dipole mreža i to tako, da su joj žice priklonjene prema horizontalnoj ravnini za kojih 45° (sl. 378.), detektor najavljuje valove. (Analogija kod svjetlosti: polarizator među polarizatorima, sl. 368.).



Sl. 378.

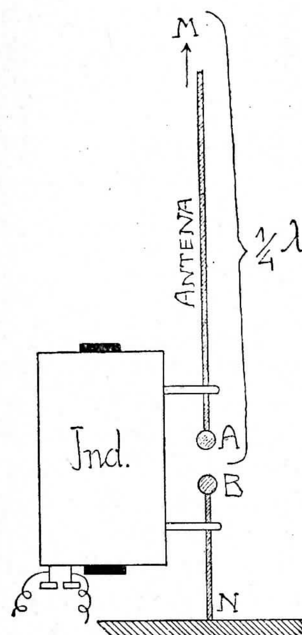
Interferencija. Potpuna sigurnost, da se kod svih tih pokusa radi o valovima, izlazi iz pokusa interferencije. Puste li se električki valovi da padnu okomito na kovnu ploču, oni se na ploči odbijaju, te odbijeni valovi idu u susret novim valovima i s njima interferiraju; u izvjesnim razmacima od ploče nastaju čvorovi električne sile t. j. mjesta, gdje je električna sila trajno = 0 na tim mjestima resonator ne pokazuje valova. Budući da se može izmjerit razmak takvih mjesta, a taj je $\lambda : 2$ (§ 251.), dade se evo dužina električkog vala pokusom odrediti. Hertz je tako u jednom primjeru našao $\lambda = 66$ cm, dok je teoretskim računom za vrijeme titraja oscilatora dobio $T = 0{\cdot}000000\,0022$ sek; izlazi po tom za brzinu $c = \lambda : T = 66 : 0{\cdot}000000\,0022 = 3 \cdot 10^{10}$ cm u sek, a to je broj, što ga je Maxwell prorekao (isp. završetak predašnjeg §).

Zad. **261.** Dokažite, da je u stojnim elektromagnetskim valovima čvor (trbuh) magnetske sile na istom mjestu gdje i trbuh (čvor) električke sile.

[Upotrebite poučak izrečen u pređ. zad.]

316. Elektromagnetska teorija svjetlosti. Maxwell uvidjevši, da se elektromagnetski učinci šire konačnom brzinom, došao je na misao, da valovi svjetlosti u bitnosti nisu drugo negoli valovi elektromagnetski. U tom

ga je utvrdio teoretski rezultat, da je brzina širenja za jedne i druge valove jednaka, a i to, da su jedni i drugi valovi transverzalni. Izvodeći potanje tu misao osnovao je Maxwell elektromagnetsku teoriju svjetlosti. Isprva se toj teoriji slaba pažnja posvećivala, no uspjesi Hertzovi doveli su je do potpune pobjede. Po toj je teoriji razlika između valova svjetlosti (i infracrvenih i ultraljubičastih) i valova dobivenih elektromagnetskim spravama u tom, što su valovi svjetlosti mnogo kraći. A kratki su zato, jer izlaze iz najsitnijih oscilatora, iz molekula i atoma. Čovječje je dakle oko detektor za elektromagnetske valove izvjesne neznatne dužine vala.



Sl. 379.

Električni valovi, što se dobivaju Hertzovim ili sličnim kojim oscilatorom, zovu se Hertzovi valovi. Između njih i spektralnih valova neprekidan je prelaz. Od doba Hertzova mnogo se nastojalo, da se taj prelaz potpuno ispita; poimence su smanjivanjem elektromagnetskih oscilatora stvarali sve kraće Hertzove valove, a traženjem zgodnih izvora topline sve dulje toplinske valove.

Otkriće elektromagnetske prirode svjetlosti bio je golem napredak u fizikalnoj spoznaji. Namjesto dviju prirodinih zagonetaka: što je elektricitet? što je svjetlost? preostala je samo prva. Uspjeh te teorije učvrstio je Maxwellovu teoriju elektriciteta i magnetizma, koja je prevladala, jer je dovela u sustavnu cjelinu malne sve tada poznate elektromagnetske pojave.[1] I današnja se nauka oslanja na Maxwellovu teoriju, no vođena novim činjenicama ona je nadopunja teorijom elektrona. Najznatnije je pokrenuo tu nauku H. A. Lorentz.

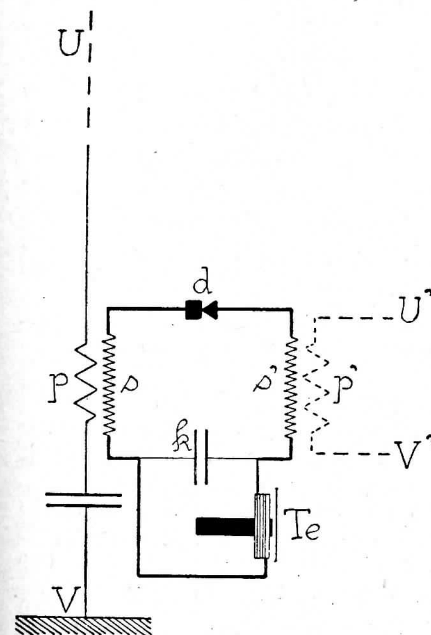
317. Radiotelegrafija. Malo godina iza Hertzovih otkrića pokazao je Marconi (1895. i dalje), da se Hertzovi valovi mogu opaziti i na mjestima, koja su makar nekoliko km udaljena od oscilatora, te mogu služiti za davanje brzojavnih znakova. U tu je svrhu na prvoj postaji Hertzov oscilator, koji je tako preinačen, da je vodič *BN* (sl. 379) sastavljen sa zemljom, a vodič *AM* produljen u vertikalan visok štap od kovine, t. zv. antenu (lat. *antenna* ili *antemna, motka za jedro, ticalo*); na drugoj je postaji isto takva antena nadovezana na koherer. Kao brzojavni znaci služe Morseovi, te kratkotrajni slijed iskara znači točku, a odulji crtu. Znaci se bilježe slično kao kod običnog brzojava.

[1]) Maxwellovo osnovno djelo „Treatise on Electricity and Magnetism" izašlo je g. 1873.

Tu vrst brzojava prozvaše brzojav bez žica, jer brzojavne postaje nisu spojene žicom, ili brzojav s valovima ili opet radiotelegrafija t. j. „brzojav sa zrakama".

Sl. 379. prikazuje samo osnovnu misao jedne vrsti radiotelegrafskog aparata odašiljača. Valovi iz takvog aparata jesu prigušeni. U svakoj iskri naime slijede električke oscilacije jedna za drugom sa sve manjim amplitudama; od svake iskre prema tome izlazi niz valova, koji su redom sve slabiji i najposlije sasvim prestanu, te nastane stanka, dok ne dođe novi niz, od slijedeće iskre.

Prigušeni valovi mogu se primati kristalnim detektorom u svezi s telefonom, kako prikazuje sl. 380. (Slika neka se ovdje zamisli bez onoga, što je nadesno prekinutom crtom prikazano.) Valovi, udarajući na antenu *UV*, u koju je uklopljena primarna uzvojnica *p* transformatora, izvode u njoj inducirane električke struje; transformacijom nastaju onda isto takove struje u uzvojnici *s* sekundarnoga kruga, koji krug sadrži još kristalni detektor *d* i telefon *Te*, a „usporedno s telefonom kondenzator *k*. Svaka iskra u prvoj postaji povod je nizu valova dakle i nizu titraja u anteni druge postaje; kroz krug detektorov poteče onda valovita struja, kojoj je smjer stalan, tako da se telefonova pločica pomakne na jednu stranu. (U telefonu struja nije valovita, jer mu je velik koeficijent samoindukcije, pa se u njem struja ne može tako brzo mijenjati; valovi struje idu u kondenzator, koji se njima nabija i izbija.) Ako je broj iskara na pr. 1200 u sek, dobiva se svake sekunde isto toliko nizova valova, pa kako svaki niz daje pločici jedan udarac, pločica načini isto toliko titraja, te se u telefonu čuje ton frekvencije 1200 titraja u sek. (Wien, „zujeće iskre".) Tonovi stalne visine, ali kraćeg ili duljeg trajanja izmjenjuju se onda kao točke i crtice na papirnoj vrpci Morseove sprave.



Sl. 380.

Drugo je telegrafiranje s neprigušenim valovima. U tom je slučaju amplituda titranja u anteni odašiljača stalna, doklegod traje Morseov znak.

Kod prigušenih valova svaki je niz valova dao jedan zamah pločici

telefona, no kod neprigušenih valova nema te razdiobe u nizove, pa se u prvi mah ne vidi, kako da se ti valovi primaju. Ta se zadaća najbolje rješava elektronskom cijevi. Ona tu služi kao izvor pomoćnih titraja (§ 223.), a frekvencija se te pomoćne struje uzimlje p o n e š t o različna od frekvencije valova, što ih hvatamo.

Na krug detektora *d* i telefona *Te* (sl. 380) puštamo da djeluju: 1. preko antene *UV* i kroz transformator *ps* titraji pobuđeni električkim valovima; 2. preko transformatora *p's'* pomoćni titraji pobuđeni elektronskom cijevi. U sekundarnim uzvojnicama *s* i *s'* pobuđene inducirane elektromotorne sile sastavljaju se i daju udare (§ 242.). Ako je na pr. frekvencija valova 100 000, a frekvencija titranja dobivenog od cijevi 102 000, dobije se svake sekunde 102 000 — 100 000 = 2000 udara; to će reći: u detektorovu krugu 2000 puta u sek amplituda titranja elektromotorne sile nabuja, a poradi djelovanja detektora telefonska pločica dobije svake sek 2000 udaraca, tako da telefon daje ton sa frekvencijom 2000. Snizi li se samo neznatno frekvencija pomoćne struje na pr. za 500 (t. j. za $^1/_2$%), broj se udara znatno promijeni, u našem primjeru od 2000 na 1500, dakle se ton u tom primjeru snizi za kvartu. Možemo dakle raiotelegrafske znakove slušati kao tonove k o j e g o d visine. Već i onda, kad samo ruku približimo kojoj česti sprave, dešava se, da se toliko promijeni kapacitet i s time frekvencija pomoćne struje, da onda i ton postaje drugi.

Treba reći, da je kristalni detektor zgodan za eksperimentiranje, jer je jednostavan. Međutim redovno se umjesto njega upotrebljava elektronska cijev (u zgodnom spoju), jer je pouzdanija i osjetljivija.

Antena. Najjednostavnija je antena vertikalna žica. Kako je trbuh titranja električke struje kod iskre, a čvor na gornjem kraju antene, obuhvata visina antene $^1/_4$ dužine vala (sl. 379.). Našlo se, da se električki valovi duž n a t e g n u t e j e d n e ž i c e šire onolikom brzinom kao i slobodni valovi u prostoru, pa je prema tomu dužina ravne antene jednaka i četvrtini dužine slobodnih valova, što od antene lete u prostor. Da se dobiju velike dužine vala, treba dakle graditi visoke antene, a te antene treba da se u gornjim dijelovima razgranjuju.

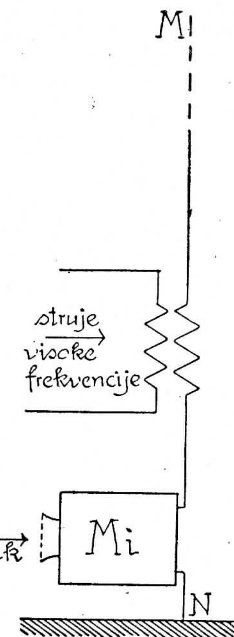
Kod primanja služi i antena u obliku o k v i r a, koja može biti i u sobi. Žica se vodi duž stranica četvorine nekoliko puta u naokolo, a na oba se kraja žice nadovežu sprave za primanje. Dobiveni okvir sa žicom namjesti se tako, da mu je jedna dijagonala vertikalna; a ravnina okvira treba da je uperena prema postaji, koja odašilje. Kako dolaze valovi, okvir obuhvata svaki čas drugi broj magnetskih silnica, te sijecanje okvira silnicama budi elektromotorne sile. Te su sile međutim malene, pa se okvir-antena vazda upotrebljava s elektronskim cijevima za pojačavanje. Ako je ravnina okvira okomita na smjeru širenja valova, onda kroz okvir ne idu nikakve silnice, te sprava ne prima. Vrteći dakle okvir oko vertikalne ravnine možemo po jakosti učinka odrediti, u kojoj ravnini leži postaja odašiljanja.

Doseg radiotelegrafskih znakova stoji poglavito do snage, koja se troši na prvoj postaji, pa onda do visine jedne i druge antene; osim toga utječu dužina vala i onda doba dana ili godine. Krajem g. 1901. primljeni su u Americi prvi radiotelegrafski znaci iz Evrope (M a r c o n i). God. 1918. dostigli su znaci postaje N a u e n antipode toga mjesta. — Činjenica, da radio-valovi mogu stići i do najudaljenijih mjesta Zemlje, bila je neočekivano otkriće.

Da protumače širenje tih valova, K e n n e l l y i malne istodobno H e a v i s i d e ustvrdili su, da su gornji slojevi atmosfere trajno ionizirani i kao vodič utječu na električke valove, koji se prema tome šire između dva vodiča: površine zemaljske i „i o n o s f e r e“ (sloj nad stratosferom, § 101.). A p p l e t o n puštao je električke valove vertikalno u vis i ispitivao je valove, koji su se iza odbijanja na ionosferi vraćali, te je zaključio, da redovno postoje u visini bar dva ionizirana sloja nestalne visine: E-sloj i F-sloj. Prvi — 100 do 120 km nad morem — zove se također Kennelly-Heavisideov sloj, drugi — u visini 230 do 250 km — Appletonov. (Uostalom ionosfera je sijelo polarne svjetlosti, § 222.).

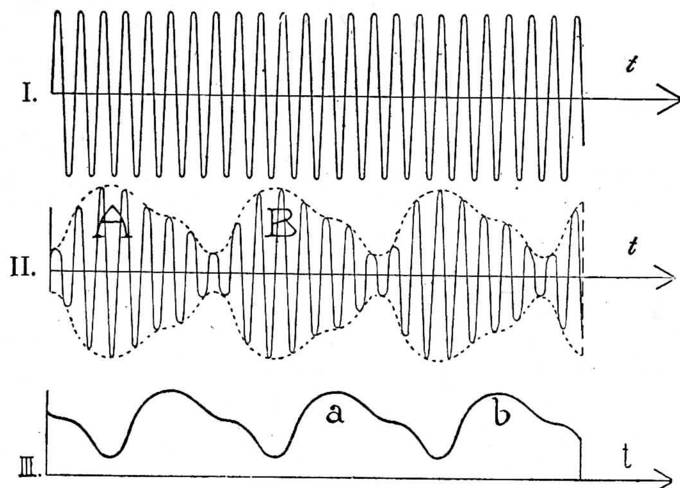
Isprva se držalo, da za velik doseg radiotelegrafije trebaju valovi osobito dugački, ali je M a r c o n i pokazao, da i „kratki“ valovi (s dužinom od nekoliko desetaka metara) mogu stići do najudaljenijih mjesta, poimence ako ih ne šaljemo n a s v e s t r a n e (b r o a d c a s t i n g, engl. *razglašivanje*), već im damo s pomoću zgodne antene o d r e đ e n i s m j e r („b e a m“-sustav; engl. *beam*, *zraka*).

Radiotelegrafsko saopćivanje točnoga doba (na pr. znaci s Eiffelova tornja u Parizu, pa iz Nauena i t. d.). Meteorološki izvještaji. Telegrafiranje s brodovima, geografskim ekspedicijama i t. d.



Sl. 381.

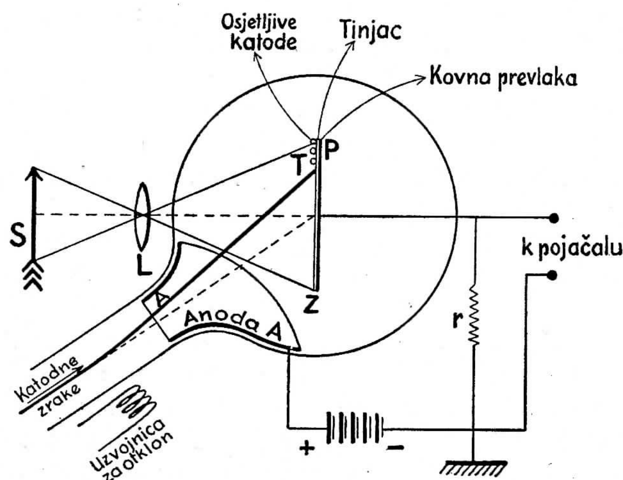
318. Radiotelefonija. N a č e l o, po kojemu se može telefonirati s pomoću slobodnih električnih valova, prikazano je u sl. 381. Na prvoj se postaji izmjenična struja, kojoj je frekvencija mnogo veća od frekvencije zvuka, šalje u primarnu uzvojnicu transformatora, kojemu je sekundarna uzvojnica uklopljena u vodič antene *MN*. U taj je vodič uklopljen i mikrofon *Mi*. Kad se mikrofon ne trese, otpor mu je stalan, te u antenu teku izmjenične struje velike frekvencije a s t a l n e amplitude (grafički predočeno u sl. 382. I.). Kad se u mikrofon govori, otpor se mikrofona mijenja u skladu s titranjem zvuka, pa se zato i amplituda titranja mijenja u skladu sa zvukom (sl. 382. II.; u toj slici dvostruka, crtkana valovita krivulja ističe, kako se mijenja amplituda i koji je prema tome zakon zvuka). Tako su eto valovi niske frekvencije na osobit način utisnuti valovima visoke frekvencije, t. zv. v a l o v i m a n o s i o c i m a. Kažemo, da su valovi nosioci m o d u l i r a n i titrajima malene frekvencije. — Izmjeničnim strujama u anteni prve postaje odgovaraju slične struje u anteni druge postaje, samo su potonje struje slabije. Da ih osjetimo kao zvuk, treba na antenu druge postaje nadovezati kristalni detektor i telefon kao kad se primaju prigušeni valovi. Detektor propušta samo struje jednoga smjera, a poradi samoindukcije telefona struja u telefonu nije visoke frekvencije, već se mijenja po onakvom zakonu, po kakvom se mijenja amplituda u anteni prve postaje t. j. po zakonu titranja zvuka. (Sl. 382. III.). Val *A* malene frekvencije u anteni prve postaje i odgovarajući val *a* u telefonu nisu istodobni, jer električni valovi trebaju vremena za širenje.



Sl. 382.

U istinu spojevi su na prvoj postaji zamršeniji nego što je ovdje prikazano, jer mikrofon ne bi podnio onoliko jakih struja, kakve treba da u antenu teku. — S razvojem radiotelefonije pokazala se potreba, da se telefon zamijeni t. zv. zvučnikom (engl. *loud speaker, koji glasno govori*), koji podnosi jače struje negoli telefon i glasno zvuči. — Ovdje razloženo prepletanje valova zvuka i valova visoke frekvencije uvodi se i kod telefoniranja na žicama, da mogu kroz jedan vod u isti mah razgovarati mnoge postaje. (Mnogostruka telefonija.)

319. Televizija. Ima nekoliko načina, kako se od nekoga događanja gradi slika na udaljenom mjestu. Među metodama televizije ističe se metoda ikonoskopa, aparata, što ga je izumio Zworykin. Na radio-



Sl. 383.

postaji, gdje se događaj zbiva, nalazi se ikonoskop, i u njemu bitni njegov dio: zastor Z (sl. 383.), na kojemu se spomoću leće L stvara slika predmeta S, koji želimo motriti na postaji primanja. Ta se slika od točke do točke prenese na postaju primanja električkim valovima 20 puta u sek (broj dovoljan, da nam se prenesena slika pričinja u vremenu neprekidnom). U tu svrhu zastor Z u misli rastavimo u dosta velik broj vodoravnih pruga ili „redaka", na pr. njih 200 (da nam slika na postaji primanja izađe i prostorno neprekidna) i pustimo na zastor svežanj katodnih zraka, koji ima širinu jednaku širini retka. Taj svežanj zgađa zastor u točki T i brzo „pipa" ili „mete" zastor, da ga obiđe potpuno u $^1/_{20}$ sek. Pri tom točka T putuje najprije prvim retkom od početka njegova do kraja, stalnom brzinom, onda skokom pređe na početak drugoga retka, da i njega jednako brzo pomete, onda skokom u treći redak itd.

To mijenjanje smjera katodnih zraka izvodi se magnetskim silama dviju uzvojnica, u kojima električna struja teče prema zakonu „preskočnih titraja": u uzvojnici, koja pomiče točku T horizontalno, struja jednoliko raste kroz $^1/_{200} \times ^1/_{20} = ^1/_{4000}$ sek do neke jakosti, onda skoči na početnu vrijednost, te nanovo raste itd.; u uzvojnici, koja prenosi točku T iz retka u redak, struja također jednoliko raste, ali svake $^1/_{20}$ sek skoči na početak.

Prema tome je ikonoskop cijev, u kojoj se stvaraju katodne zrake i to iz užarene katode (ta katoda kao i njezina anoda nisu u sl. 383. prikazane). Sam zastor Z jest list od tinjca, posvuda jednako debeo, pokrit na stražnjoj strani kovnom prevlakom P, a na prednjoj jednim „mozaikom" sastavljenim od mikroskopskih kuglica od vodiča (cezijev oksid), međusobno izoliranih, a osjetljivih za svjetlost. Svaka kuglica čini katodu fotoelektričke stanice, a nebrojenim (kojih 3 miljuna) tim katodama pripada kao zajednička anoda AA uz stijenu ikonoskopa; ta anoda spojena je žicom s pozitivnim polom baterije akumulatora. Katode-kuglice nisu vodičem spojene s negativnim polom, kako to inače biva kod fotoelektričke stanice, već je svaka kuglica jedan vodič sitnog kondenzatora, kojemu je izolator tinjac, a drugi je vodič svima tima kondenzatorčićima zajednički, naime ona prevlaka P. Tekar ta prevlaka spojena je s negativnim polom baterije.

Kada svjetlost udari na kuglicu, započinje fotoelektrički pojav: kuglica emitira elektrone i postepeno se nabija pozitivnim elektricitetom i veže u prevlaci P u susjedstvu elektrone, koji pritječu kroz otpornik r iz baterije. Međutim to nabijanje ne traje dugo, jer najkasnije za $^1/_{20}$ sek stigne svežanj katodnih zraka i svojim elektronima uništi pozitivni naboj kuglice. Pri tom se elektroni vezani u P brzo oslobode i slabašnom strujom vode u pojačalo. Što je jača rasvjeta kuglice, to brže raste njezin naboj i to jača će biti struja, koja pođe u pojačalo, kada katodni svežanj napipa tu kuglicu.

Iz pojačala izlazi dakle struja, koja se tako mijenja, kako se mijenja rasvjeta stanice, koja je katodnim zrakama baš pogođena.

Te struje nametnu se električkim valovima nosiocima, da ih moduliraju (isp. pređ. §). Ako katodni svežanj opiše u sekundi 4000 redaka, a u svakom retku hoćemo razlikovati na pr. 200 tančina, imade promjenâ struje, koje želimo prenijeti, 800000 u sek. Prema tome valovi nosioci treba da imadu osobito veliku frekvenciju na pr. 100 milijuna ($\lambda = 3$ m; „ultrakratki" valovi!).

Na postaji primanja treba kao kod radiotelefonije stvarati električnu struju, kojoj se jakost onako mijenja, kako se mijenja amplituda valova nosilaca. Tom strujom mijenja se onda svjetloća na zastoru Z', gdje se hvata prenesena slika. Taj zastor može biti na pr. fluorescirajući zastor u Crookesovoj cijevi. U tom slučaju puštamo, da sliku stvara uzak svežanj katodnih zraka, koji putuje točkama T' zastora Z' baš onako kao i točka T na zastoru Z ikonoskopa. Naročita je dakle zadaća, koju je valjalo riješiti, kako da se podržaje sinhronizam u pomicanju točaka T' i T. Da slika u svakoj točki ima valjanu svjetloću, mijenja se na zgodan način broj elektrona u svežnju katodnih zraka, jer više elektrona proizvodi jaču fluorescenciju. Prema tome prenosom dobivena električka struja svojim promjenama jakosti regulira broj elektrona.

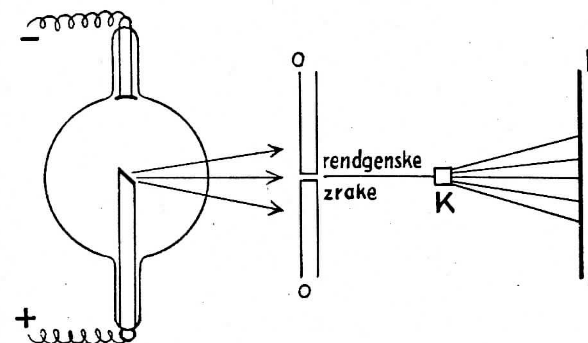
Prvi valjani način „pipanja" ili „metenja" slika izumio je Nipkow već g. 1884, ali se taj izum u ono doba nije mogao iskoristiti, budući da još nije bio poznat Hallwachsov pojav. Prve vrlo čedne televizijske pokuse pokazali su Jenkins 1923. i Baird 1926. Zworykinov zastor opisan je u USA-patentu g. 1925.

320. Röntgenovi valovi. — O Röntgenovim zrakama (isp. § 227.) nabačeno je bilo mišljenje, da su roj sitnih čestica, no većina se fizičara odmah priklonila mišljenju, da su i one valovi poput svjetlosti, ali još za mnogo kraći. Baš za takve valove izlazilo je naime iz teorije, da se ne lome i ne odbijaju i da lako prodiru kroz tvari. U prilog tom mišljenju bile su činjenice, da Röntgenove zrake poput ultraljubičastih izazivlju fluorescenciju, ioniziraju uzduh i djeluju na fotografsku ploču. Laue je zamislio pokus, kojim se je to mišljenje utvrdilo (1912.), te danas razlikujemo ove — po dužinama valova poređane — skupine elektromagnetskih valova:

Hertzovi — infracrveni — svjetlost — ultraljubičasti — Röntgenovi — gamazrake — kozmički fotoni.

Laueovo otkriće tiče se osobitog savijanja Röntgenovih zraka u lecima, upravo njihova ogiba ili difrakcije. U kristalografiji već se od 90 godina ovamo uzimlje, da su atomi u lecu pravilno poređani u nizove, a nizovi

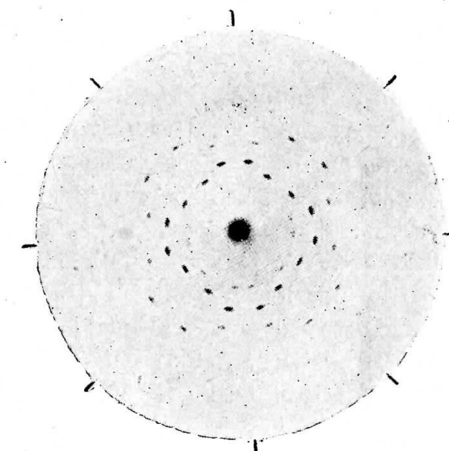
atoma u t. zv. prostornu mrežu. Tako u jednostavnom primjeru slankamena NaCl treba zamisliti ledac sagrađen od sićušnih kocaka, gdje je svaki atom natrija (klora) zaposio vrh, u kojemu se sastaje 8 kocaka, te ima za najbliže susjede (njih 6) atome klora (natrija). Laue se dosjetio, da bi baš ta od prirode stvorena mreža mogla poslužiti, da se pokaže ogib rendgenzraka. Ako su doista te zrake valovi mnogo puta kraći od valova svjetlosti, optička mrežica (§ 303.) za njih je prekrupna. Konstanta obične Rowlandove mrežice iznosi 17000 ångstr. jed., dok je udaljenost susjednih atoma slankamena samo 2·82 ångstr. jed. Kristalna je mreža međutim zamršenija od optičke, jer dok je struktura optičke mreže periodična samo u jednom smjeru, kristalna je mreža trodimenzionalna; zato je i pojav ogiba u tim primjerima različit.



Sl. 384.

Sam Laueov pokus u načelu je vrlo jednostavan. Kroz malen otvor u olovnom zaslonu O (sl. 384.) izlazi uzak svežanj rendgenzraka, pada na ledac K i kroz anj na fotografsku ploču FF, gdje seo gibom stvara „Laueov diagram": uski svežanj zraka razišao se u odabrane smjerove i pogodio ploču u točkama, koje svojim poređajen i intenzitetom pokazuju očitu pravilnost. Slika 385. prikazuje Laueov diagram, kada je ledac bio tutijin sjajnik [1]). Ti su likovi vrlo raznovrsni, prema tome s kakvim se lecem eksperimentira, a i prema tome kojim smjerom zraka prolazi kroz ledac. Poznavajući strukturu leca možemo izračunati dužine vala za pojedine točke diagrama. U drugu ruku istraživanje toga diagrama vodi na poznavanje spomenute strukture.

Razmak atoma u slankamenu lako se izračuna. Ako je taj razmak x cm, dolazi na 1 cm $1/x$ atoma, a 1 cm³ leca sadržaje $1 : x^3$ atoma; od toga su polovica atomi natrijevi, polovica klorovi. Budući da je atomna težina natrija 23·00, klorova 35·46, težina je tih atoma u gramima 22·0) : A i 35·46 : A, gdje je Avogadrov broj $A = 6{\cdot}03 \times 10^{23}$. No težina 1 cm³ slankamena je 2·17 g (spec. tež.), tako da izlazi jednadžba $\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{x^3} \cdot \frac{23{\cdot}00 + 35{\cdot}46}{A} = 2{\cdot}17$, a iz nje $x = 2{\cdot}82 \times 10^{-8}$ cm $= 2{\cdot}82$ ångstr. jed.


Sl. 385.

* 1) Snimili: Laue, Friedrich i Knipping.

321. Rendgenski spektri. Kratko vrijeme iza Laueova otkrića pokazali su W. H. Bragg i W. L. Bragg, kojim se jednostavnijim načinom mogu odrediti — opet s pomoću ledaca — dužine rendgenvalova i kako se mogu graditi spektrografi, kojima se dobivaju rendgenski spektri poput spektara svjetlosti.

Ispitivanje tih spektara pokazalo je znamenite pravilnosti. U prvom redu izlazi da rendgenzrake iz svake rendgencijevi daju neprekidan spektar, koji je na strani kraćih valova kao odrezan. Ako je V volta napetost u Röntgenovoj cijevi, onda elektroni ubrzani tom napetošću stvaraju udarajući na anodu zrake, čiji neprekidni spektar ima najmanju dužinu vala $\lambda = 12336 : V$ ångstr. jed., te je na pr. kod napetosti 50000 volta najmanje $\lambda = 0{\cdot}247$ ångstr. jed., dok kod 100000 volta najkraći valovi imadu dužinu 0·123 ångstr. jed. (Isp. s time dužine valova svjetlosti: 8000 — 4000 ångstr. jed.).

To vrijedi bez obzira na to, od kakve je tvari anoda. Vidimo, da većoj „tvrdoći" odgovaraju manje dužine vala.

Osim toga anoda rendgencijevi emitira još i „karakteristični spektar". To je linijski spektar, koji se vlada prema kemijskom elementu, od kojega je anoda načinjena. Za različite elemente ti su spektri međutim slični i crte spektralne pravilno se pomaknu prema kraćim valovima, kada neki element kao anodu zamijenimo elementom, kojemu je redni broj za 1 veći. U toj pravilnosti našao je Moseley (1913.) sredstvo, da pouzdano odredi redni broj, te je g. 1915. utvrđeno, da je zadnji element periodičkog sustava, naime uran, po redu 92. i da još nisu poznati elementi 43., 61., 72., 75, 85. i 87. Baš uz pomoć istraživanja rendgenskih spektara našli su se onda naskoro elementi 72., hafnij (g. 1923.) i 75., renij (g. 1925.).

6. Nauk o kvantima

322. Planckova konstanta. Tražeći, kakvo je žarenje crnoga tijela (§ 312.) zasnovao je Planck nauku o „kvantima" (1900.). Po njoj tjelesa ne emitiraju elektromagnetskih valova neprekidno, već izbacuju energiju u nekim sitnim množinama; taj izbačeni „kvant" energije nije u svima prilikama jednak, već zavisi o frekvenciji valova n, te je $= h \cdot n$. Faktor h zove se „Planckova konstanta", pa je $h = 6{\cdot}61 \cdot 10^{-27}$, ako energiju mjerimo ergima, a vrijeme sekundama. Ako se dakle emitiraju Röntgenove zrake sa frekvencijom na pr. 10^{18}, najmanja je emitirana energija $6{\cdot}61 \cdot 10^{-27} \cdot 10^{18} = 6{\cdot}61 \cdot 10^{-9}$ erga, a žutoj svjetlosti frekvencije $5 \cdot 10^{14}$ pripadaju kvanti $6{\cdot}61 \cdot 10^{-27} \cdot 5 \cdot 10^{14} = 3{\cdot}30 \cdot 10^{-12}$ erga. Iza prvoga otkrića veličine h, do kojega je vodio zamršen put teorije, pokazalo se, da premnogi pojavi na nju upućuju, tako da je Planckov h fizikalna veličina osnovne važnosti.

323. Foton. Na Planckovu konstantu vodi neposredno fotoelektricitet, koji će se sada potpunije objasniti.

U § 226. reklo se, da izoliran vodič, na koji padaju ultraljubičaste i t. d. zrake, postaje pozitivno električan. Elektrometar spojen s vodičem pri tome pokazuje, da imade granica, iznad koje se električna napetost vodiča ne može uzdići, kolikogod dugo rasvjetljujemo vodič. Tako na pr. zrake s dužinom vala 3000 ångstr. jed. nabijaju natrij do napetosti + 2 volta i ne više. Tumači se to ovako: elektroni, što se zrakama istjeruju iz vodiča, izbacuju se s brzinama, kojih najveća ne prekoračuje izvjesne granice; isprva se poradi gubitka (negativnih) elektrona vodič sve više nabije pozitivno, te privlači sve jačim silama elektrone; i dok se isprva samo sporiji elektroni „padom" povrate u vodič — onako kako se i kamen bačen u vis vrati k zemlji —, najposlije naboj vodiča toliko naraste, da se ne mogu ni najbrži elektroni onoj privlačnosti oteti, te nijedan elektron ne odleti u nepovrat. Naboj onda više ne raste.

Ako je m masa elektrona, v brzina najbržih elektrona u času emisije, kinetička je energija elektrona — kad izleti — $mv^2/2$. Ako je u drugu ruku V napetost vodiča, e elektricitet elektrona, treba izvršiti radnju $V \cdot e$, da elektron s vodiča pređe u zemlju. Doklegod je ta radnja manja od one kinetičke energije, najbrži će elektroni za uvijek ostaviti vodič i naboj će vodičev rasti. Najposlije će napetost udovoljavati formuli $V \cdot e = mv^2/2$. Veličine m i e u toj su formuli poznate (Tablica!), a V se može izmjeriti (sve u el.-st. c-g-s-jed.!); brzina v može se dakle izračunati, te na pr. u spomenutom već primjeru $V = 2$ volta izlazi $v = 842$ km/sek. (Izračunajte to!)

Pokusi, što se ovdje spominju, treba da se izvode u praznome prostoru, da ne bi elektroni ionizirali uzduha i time pojav zamrsili.

Druga je važna činjenica, da najveća napetost V ne stoji do jakosti zrākâ, kojima vodič rasvjetljujemo; drugim riječima: brzina najbržih elektrona kod najslabijih je zraka tolika kao i kod najjačih. (Razlika djelovanja slabe i jake svjetlosti samo je ta, što u prvom slučaju izleti iz vodiča u 1 sek manje elektrona, pa treba i više vremena, dok vodič poprimi svoj konačni pozitivni naboj). Da shvati tu činjenicu, Einstein uzimlje, da svjetlosni i slični valovi nisu jednolično rasprostrti u prostoru, već da im je energija stisnuta u pojedinim odijeljenim mjestima, u česticama ili kvantima svjetlosti (novi oblik korpuskularne teorije svjetlosti! G. 1905.). Te čestice danas obično zovu fotonima. Kad bi se svjetlost širila tako, da su plohe vala neprekidne kuglaste površine, koje širenjem postaju sve veće, amplituda bi se titranja širenjem vala smanjivala, pa nije jasno, kako bi (električke) sile oslabljene svjetlosti davale elektronima takve brzine kao i jaka svjetlost. Naprotiv prihvaćajući „zrnat" sastav svjetlosti

pomišljamo, da foton — kakogod daleko odleti — vazda ima u sebi zgusnutu jednaku energiju $h \cdot n$. Einstein uzimlje, da kod fotoelektričnog pojava kinetička energija svakoga izbačenoga elektrona nastaje na trošak jednoga fotona $h \cdot n$. Pri tome se od te energije jedan dio i to bar neki dio P potroši na to, da se elektron otkine od vodiča, a ostatak se javlja kao ona kinetička energija. Vrijedi dakle Einsteinova formula.

$$V \cdot e = mv^2/2 = h \cdot n - P.$$

Ako je frekvencija n premalena, tako da je $h \cdot n < P$, nema u fotonima dosta energije, te iz vodiča ne može izletjeti nijedan elektron i nema fotoelektričnog pojava. Radnja P za različite je tvari različita, te je na pr. za natrij granica fotoelektričnog pojava kod frekvencije $n = 515 \cdot 10^{12}$ (dužina vala 5810 ångstr. jed.), pa svjetlost još manje frenkvencije (žuta i crvena svjetlost) ne može na natrij djelovati fotoelektrički.

Napisana formula kazuje, da s porastom frekvencije n napetost V raste po zakonu pravca. Ona je u odličnom skladu s mjerenjima, što ih je Millikan izveo, te je osobito zgodna za određivanje veličine h.

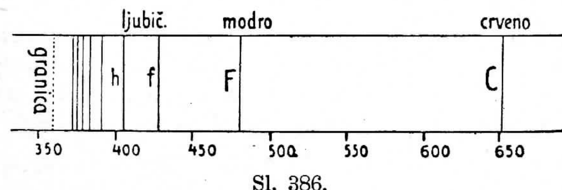
Stvaranje rendgenskih zraka može se shvatiti kao obrnut fotoelektrički pojav: dok u fotoelektričkom pojavu uništavanjem fotona nastaju kinetičke energije elektrona, dotle se u rendgenskoj cijevi fotoni stvaraju, i to na račun kinetičke energija elektrona. Prema tome se i granica neprekidnog rendgendskog spektra spomenuta u § 321. sasvim slično tumači kao granica fotoelektričkoga pojava: udarcem elektrona o anodu rendgenske cijevi ne može nastati nijedan rendgenski foton, kojemu bi energija bila veća od kinetičke energije elektrona.

Za tu najveću energiju fotona vrijedi dakle obrnuta Einsteinova formula

$$h \cdot n = V \cdot e,$$

što je samo drugi oblik formule za graničnu dužinu vala neprekidnog spektra (§ 321.). Potonja formula rezultat je mjerenja, te se Planckova konstanta dade i iz nje izračunati.

324. Balmerov niz. Planckova konstanta ulazi i u Bohrovu atomsku hipotezu (Bohr 1913.). Kako je ta hipotezn u prvom redu zamišljena bila, da protumači spektar vodikov, upoznat ćemo se sa zakonom toga najjednostavnijega spektra.



Sl. 386.

U spektru Geisslerove cijevi, u kojoj je razrijeđeni vodik, vidimo četiri svjetle crte, koje se podudaraju s Fraunhoferovim crtama C (crveno), F (modro), f (ljubičasto) i h (ljubičasto). Fotografija toga spektra pokazuje još i mnogo crta ultraljubičastih, koje se zgušćuju uz neku granicu, preko koje više nema crta (sl. 386.).

Crte imadu u praznome prostoru dužine vala redom (počevši od C-crte; Ångstr. jedinice!) 6563·1, 4861·5, 4340·6, . . ., pa onda na pr. 29. crta 3661·4 i t. d. Ako izračunamo redom umnoške

$$6563{\cdot}1 \cdot (1 : 2^2 - 1 : 3^2) = 911{\cdot}541$$
$$4861{\cdot}5 \cdot (1 : 2^2 - 1 : 4^2) = 911{\cdot}531$$
$$4340{\cdot}6 \cdot (1 : 2^2 - 1 : 5^2) = 911{\cdot}526$$
$$\dots$$
$$3661{\cdot}4 \cdot (1 : 2^2 - 1 : 31^2) = 911{\cdot}540$$
$$\dots,$$

izilazi, da su ti umnošci jednaki. Dužine se vala λ u nizu crta mogu dakle izračunati iz formule

$$\lambda \cdot (1 : 2^2 - 1 : u^2) = 911{\cdot}53,$$

ako za u redom stavimo cijele brojeve 3, 4, 5, i t. d. Granici pripada dužina vala, koja slijedi iz te formule, ako je $u = \infty$, te je za granicu dužina vala 3646·1.

Taj se niz crta zove Balmerov niz; njegov zakon otkriven je numeričkim pokusima, bez teoretskih izvoda (Balmer 1885.). Kasnije su se u vodikovu spektru našla još dva niza crta, kojih dužine vala izlaze iz formula

$$\lambda \cdot (1 : 1^2 - 1 : u^2) = 911{\cdot}53 \quad \text{i} \quad \lambda \cdot (1 : 3^2 - 1 : u^2) = 911{\cdot}53.$$

U prvoj formuli treba staviti $u = 2$ ili 3 ili 4 i t. d., u drugoj 4 ili 5 ili 6 i t. d. Crte prvoga niza sve su ultraljubičaste, crte drugoga sve infracrvene. Prema svemu tome treba držati, da za vodik općeno vrijedi formula

$$\lambda \cdot (1 : s^2 - 1 : u^2) = 911{\cdot}53,$$

gdje su s i u cijeli brojevi, $u > s$.

Zgušťavanje crta uz granicu Balmerova niza sasvim je druge vrsti negoli zgušťavanje crta kod spektralnih vrpca spomenutih u § 298.; uz glavu vrpce ima vrlo mnogo crta, uz granicu Balmerova niza beskrajno mnogo.

Nizovi vodikovih crta nikako se ne daju objasniti sličnim pomislima, kakvima se tumače nizovi gornjih tonova u akustičkih sprava. Prvi znameniti korak u tumačenju Balmerove i sličnih zakonitosti učinio je Bohr (1913.). Po njemu emisija svjetlosti iz atoma nije trajan događaj, već časovit. Jednim mahom čestica svjetlosti energije $h \cdot n$ izleti iz atoma i pri tom atom prijeđe iz stanja, u kojemu je imao energiju E_1, u stanje s energijom E_2, te prema zakonu energije vrijedi „Bohrov uvjet frekvencije"

$$h \cdot n = E_1 - E_2.$$

Bohr je razabrao, da vrijednosti atomove energije ne mogu biti kojegod, kako bi se prema klasičnoj fizici i mehanici očekivalo, već da atomove energije čine nizove odijeljenih vrijednosti, koje se određuju uz pomoć Planckove konstante h. Da dokuči teoretski te vrijednosti, zamislio je Bohr hipotezu atomsku, koja je dovela do mnogih valjanih novih rezultata. Ipak joj se moglo štošta prigovoriti, te su je nadomjestile „kvantna" i „valna" mehanika.

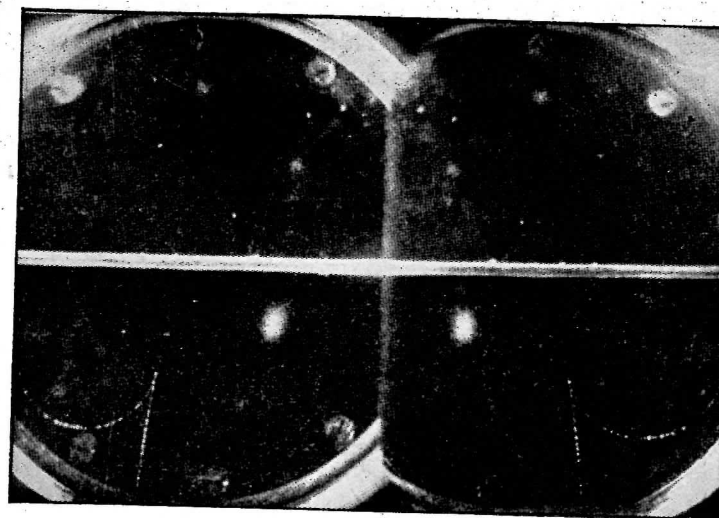
325. Korpuskularni valovi. G. 1927. ispitivali su Davisson i Germer, kako se odbijaju elektroni (katodne zrake) na lecu nikalja. Izašao im je neočekivan rezultat, da se elektroni odbiti od leca navraćaju u pojedine međusobno odijeljene smjerove. Naskoro se opazilo, da je to u skladu sa teoretskim shvaćanjem, što ga je iznio već g. 1924. L. de Broglie: da korpuskulama, koje se giblju, treba pripisati i svojstvo valova. Kaošto svjetlost uz svoju valnu prirodu prema novijim spoznajama pokazuje i korpuskularan sastav (fotoni!), tako elektron, koji se giblje brzinom v, nije samo korpuskula, već nosi sa sobom neki osobiti valovit pojav. Za dužinu tih korpuskularnih valova nalazi de Broglie jednadžbu $\lambda = h:mv$, gdje je h Planckova konstanta, m masa elektrona.

Prema tome pokusi Davissona i Germera nisu bitno različni od Laueova (sl. 384.), te oni pokazuju ogib (difrakciju) elektronskih valova na kristalnoj mreži. Iz ogiba određuje se dužina vala, pa vrijednosti λ izračunane iz rezultata Davissonovih i Germerovih mjerenja doista jesu u skladu sa de Broglievom jednadžbom.

Kraj te analogije elektronskih valova i svjetlosti nova nauka „elektronska optika“ ispituje sličnost elektronskih zraka sa zrakama svjetlosti. To je važno, jer se katodne zrake sve više praktički upotrebljavaju. Našlo se, da se mogu zgodnim elektriziranim zaslonima katodne zrake savijati onako, kako leća lomi svjetlost, i da se isto može postići magnetskim poljima (Busch 1926.). Iz takvih „elektronskih leća“ sastavlja se elektronski mikroskop, koji podsjeća na obični mikroskop, tek se u njemu kroz istraživani predmet umjesto svjetlosti puštaju katodne zrake. Taj mikroskop dopušta daleko veća povećanja nego li obični i pokazuje čak i molekule. Ta je velika rastvorna snaga u svezi s time, što brzim elektronima pripadaju valovi mnogo kraći od valova svjetlosti.

326. Materijalizacija fotona. U § 236. spomenulo se, da se pozitron iza kratka bitka združi s elektronom i nestane. Više se može reći o obrnutom procesu: rađanju para tih čestica nestajanjem fotona. U fotoelektričkom pojavu foton se uništava, da se od njegove energije stvori kinetička energija elektrona. Kod stvaranja parova od fotonove se energije stvori ne samo kinetička energija elektrona i pozitrona već i same te čestice. „Wilsonovom metodom“ (§ 231.) dobivena slika 387. prikazuje takav događaj [1]). U njoj vidimo dvije magnetom zakrivljene staze korpuskula, koje

[1]) Snimio: Anderson.



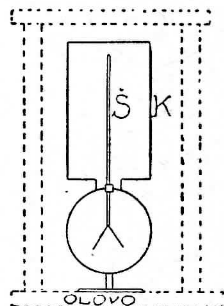
Slika 387.

izlaze iz jedne točke. Kako je snimka stereoskopska (§ 288.), pokazuje, da se zajedničko ishodište obiju zraka nalazi u plinu Wilsonove komore (ne možda na stijeni). Zraka jače zakrivljena pripada elektronu, ona druga, na protivnu stranu svinuta, mnogo brža (99% energije), pozitronu. Zaključuje se, da su elektron i pozitron nastali iz kozmičkoga fotona, koji je odozgo doletio i posredovanjem plinskoga atoma se materijalizirao.

Kratko vrijeme iza kako je dobivena prva takva snimka (Anderson), mogli su I. Curie i Joliot pokazati stvaranje parova uništenjem gama-fotona emitiranog iz radioaktivnog elementa ThC'' (torij C''). Budući da je poznata frekvencija fotona toga elementa, taj je primjer poučniji. Masa mirnoga elektrona, $9{\cdot}1 \times 10^{-28}$ jest prema jednadžbi $E = mc^2$ (§ 57.) ekvivalentna energiji $9{\cdot}1 \times 10^{-28} \times 9 \times 10^{20} = 8{\cdot}2 \times 10^{-7}$ erga, a isto je tolika (ili približno tolika) i energija mirnog pozitrona. Da se stvore takve dvije čestice, treba dakle potrošiti bar $1{\cdot}64 \times 10^{-6}$ erga; no energija gama-fotona elementa ThC'' je $hn = 4{\cdot}2 \times 10^{-6}$ erga; od toga se kod uništenja fotona potroši na stvaranje korpuskula $1{\cdot}6 \times 10^{-6}$ erga, a ostatak $2{\cdot}6 \times 10^{-6}$ erga na to da novorođene čestice dobiju kinetičku energiju. — Iz energije čestica u sl. 387. izračunalo se, da je energija kozmičkoga fotona, koji se uništio, 8×10^{-4} erga; tomu odgovara dužina vala $c:n = 0{\cdot}000025$ Ångstr. jed., dok je dužina vala malo prije spomenutog gama-fotona 0·0047 (dužina valova svjetlosti 4000 do 8000).

*

327. Kozmičke zrake. Štapić elektrometra *Š* neka seže u ionizacionu komoru *K* (sl. 388.). Tanki lim, od kojega su stijene komore, spojen je s kućicom elektrometra. Nabija li se štapić elektricitetom, opazit ćemo, da se naboj postepeno gubi. Pri tome elektricitet ne odilazi samo kroz izolator, u koji je štapić učvršćen, već se gubi i kroz uzduh, što se vidi otuda, da naboj brže pada, ako obujam komore povećamo: u većem obujmu ima više iona, više čestica, koje odnose naboj sa štapića. Ako se elektrometar zajedno s komorom zatvori u debeo oklop od olova, naboj se gubi sporije. Očito se tim zaštićivanjem sprečava stvaranje iona.



Sl. 388.

Isprva pripisivali su ionizaciju uzduha u komori gamazrakama, koje lete iz radioaktivnih tvari zemaljske kore, a olovo ih zadržava. Međutim se opazilo mjerenjima u balonu, a Hess je to pobliže utvrdio (1910.), da se u višim slojevima atmosfere uzduh brže ionizira nego li na površini morskoj. U drugu ruku pokazala se golema prodirna snaga zraka, koje proizvode tu ionizaciju; aparature s elektrometrima puštale su se u jezera, pa kako se pri tom pokazalo smanjivanje ionizacije, učinak se ipak mogao pratiti do velikih dubljina, ekvivalentnih olovu debelu nekoliko metara. Iza tih spoznaja odmah se pomišljalo za te zrake, koje ioniziraju uzduh, da dolaze izvana u atmosferu zemaljsku, ali se oprezno nije isključila mogućnost, da je ishodište tih „prodirnih zraka" možda ipak negdje u hipotetičkim radioaktivnim tvarima visokih slojeva atmosfere.

Međutim kada se našlo, da u okolišu ekvatora ima nešto manje prodirnih zraka nego li pod većim geografskim širinama, prestale su sumnje o tome, da su te zrake „kozmičke zrake", i to znatnim dijelom električke čestice, kojima magnetsko polje zemaljsko najjače sprečava dolaženje u ekvatorijalne krajeve. Najposlije su mjerenja pokazala i to, da kod različitog namještaja Sunca zrake jedva mijenjaju svoj učinak, a ne mijenjaju ga ni prema orijentaciji Mliječne Staze, iz česa slijedi, da dolaze iz najvećih dubljina Svemira, iz prostora izvan našega zvjezdanoga sustava.

Wilsonove fotografije staza kozmičkih zraka dopuštaju, da se ocijene energije pojedinih zraka, kako je to već spomenuto u primjeru sl. 387. Energija kozmičkoga fotona, koji se u tom primjeru materijalizirao, bila je tolika, kolika bi bila kinetička energija elektrona, koji bi se ubrzao u golemoj Crookesovoj cijevi napetošću 500 miljuna volta. Još veću, naime 3 puta veću energiju imao je foton, koji je udario u atom olova i prouzročio „tuču" kozmičkih zraka, uhvaćenu na fotografiji sl. 276. na str. 241. Takve tuče otkrili su Blackett i Ochialini (1936.). Rijetke među njima s golemim brojem elektrona i pozitrona, njih makar tisuće, zovu se Hoffmannovi udarci, jer je njihove učinke na elektrometar (brz porast ionizacije) opazio Hoffmann već g. 1930.

Uostalom kozmičke zrake, kako ih istražujemo na dnu atmosfere, nisu one iste, koje su stigle iz Svemira. U gornjim slojevima atmosfere one se raznovrsnim procesima pretvaraju u sekundarne zrake. Tako se kozmički foton može materijalizirati, time nastale čestice mogu udarajući u atome opet stvoriti fotone, koji se opet pretvore u parove itd., pri čemu broj korpuskula i fotona sve više raste, pa im i energije opadaju. Neke Wilsonove fotografije upućuju na drugu mogućnost: da kozmička zraka razbije atomsku jezgru. Najposlije sekundarnim česticama smatramo također mezotrone. To su čestice pozitivno ili negativno električne, velike prodirne snage. Probijaju centimetar debele ploče od olova ili platine ne mijenjajući primjetljivo brzinu i ne stvarajući tuče. Masa im se cijeni na 100 do 200 elektronskih masa, dakle je „srednja": veća od elektronske mase, manja od protonove; otuda i ime čestice (grč. μέσος, *srednji*). Teoretski predvidio je takvu česticu Yukawa (1935.) tri godine prije, nego što su se tragovi njezini našli u Wilsonovoj komori.

Tablica

Konstante

Konstanta gravitacije	=	$6{\cdot}7 \cdot 10^{-8}$	(§ 48.)
Konstanta plinova	=	$8{\cdot}315 \cdot 10^{7}$	(§ 119.)
Avogadrov ili Loschmidtov broj	=	$6{\cdot}03 \cdot 10^{23}$	(§ 120.)
Elektricitet elektrona i protona	$e = \mp$	$4{\cdot}80 \cdot 10^{-10}$	(§ 155.)
Masa elektrona	=	$9{\cdot}1 \cdot 10^{-28}$	(§ 155.)
Masa protona	=	$1{\cdot}67 \cdot 10^{-24}$	(§ 120.)
Brzina svjetlosti	$c =$	$2{\cdot}9977 \cdot 10^{10}$	(§ 269.)
Planckova konstanta	$h =$	$6{\cdot}61 \cdot 10^{-27}$	(§ 322.)

Jedinice za radnju:

1 kg*m = 9·80665 džula
1 džul = 10^7 erga
1 vatsat = 3600 džula

Jedinice za snagu:

1 KS = 0·736 kilovata
1 KS = 75 kg*m/sek
1 vat = 1 džul/sek

Toplina i radnja:

1 kgkal = 427 kg*m
1 gkal = 4·185 džula

Jedinice za:

jakost elektr. struje	1 amp	= 0·1 el.-magn. c-g-s—jed.	= $3 \cdot 10^9$ el.-st. c-g-s—jed.
množinu elektriciteta	1 kulon	= 0·1 el.-magn. c-g-s—jed.	= $3 \cdot 10^9$ el.-st. c-g-s—jed.
napetost	1 volt	= 10^8 el.-magn. c-g-s—jed.	= $\frac{1}{300}$ el.-st. c-g-s—jed.
kapacitet	1 farad	=	$9 \cdot 10^{11}$ el.-st. c-g-s—jed.

K A Z A L O:

(brojevi znače strane)

S A D R Ž A J:

U V O D

I. MEHANIKA

1. Mehanika tvarne točke

a) Statika točke

b) Dinamika pravocrtnoga gibanja

c) Dinamika krivocrtnoga gibanja

d) Mehanika nebeska

ISPRAVCI:

Str. 2.	redak 10. odozdo	umj.	00001	stavi:	0·0001
„ 37.	„ 9. „	„	Foncaultov	„	Foucaultov
„ 39.	nejasni broj iza:	Sunca		glasi:	148500000
„ 53.	redak 27.	umj.	te inom	„	težinom
„ „	„ 7. odozdo	„	gornjo-	„	gornjoj
„ 54.	„ 6.	„	sjedne	„	s jedne
„ 57.	„ 3.			izostavi zarez	
„ 60.	„ 10.	„	omada	stavi:	komada
„ 64.	„ 20.	„	voći	„	veći
„ 66.	„ 8.	„	toga	„	tlaka
„ 83.	„ 11. odozdo	početak retka glasi:		$AB = BC = ..$	
„ 89.	„ 18. odozdo	umj.	ćašom	stavi:	čašom
„ 102.	„ 11.	„	Kervin	„	Kelvin
„ 105.	„ 2.	jednadžbu ispravi u:		$v - v_0 = a \cdot v_0 \cdot t$	
„ 121.	„ 3. odozdo	umj.	amomijak	stavi:	amonijak
„ 123.	u skrižaljci nejasni brojevi za krit. temperature kisika i dušika glase: —119 i —147				
„ 138.	redak 5.	umj.	daklinacija	stavi:	deklinacija
„ 144.	ispod slike	„	136	„	163
„ 205.	redak 8. odozdo	„	V_u	„	V_a
„ 206.	„ 8. „	„	titraja	„	titranja
„ 258.	„ 2.	„	297	„	294
„ 332.	„ 5. odozdo	„	7 3	„	7·3
„ 365.	„ 8. „	„	22·00	„	23·00